MUTACION Y RESISTENCIA A LOS ANTIBIOTICOS • TECNICA CONTRA TERROR

INVESTIGACION y CIENCIA

DICIEMBRE 2002
5 EURO

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

EL VEHICULO DEL CAMBIO

CONTROL CEREBRAL DE ROBOTS

VACIOS ESPACIALES

TIBURONES DE AGUA DULCE

PARARRAYOS EN NANOELECTRONICA





Diciembre de 2002 Número 315

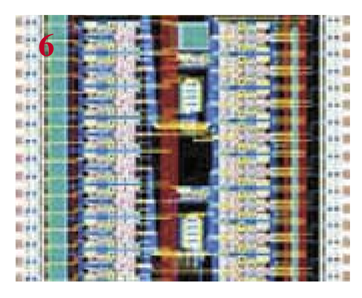
SECCIONES















Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

SECCIONES



DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Telefax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Michelle Press
ASSISTANT MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Carol Ezzell, Steve Mirsky y George Musser
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNACIONAL Charles McCullagh
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN Rolf Grisebach

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Aragoneses, 18
(Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 914 843 900

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Teléfono 934 143 344

PUBLICIDAD

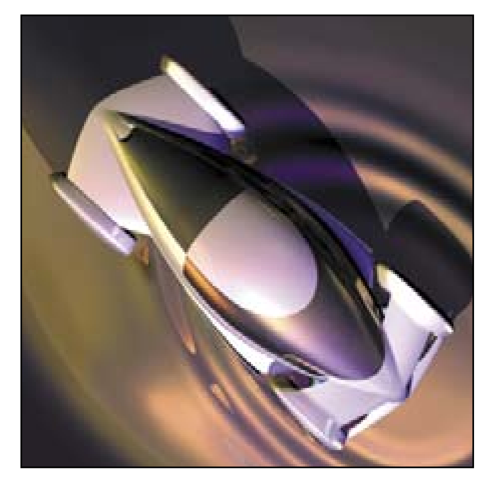
GM Publicidad
Edificio Eurobuilding
Juan Ramón Jiménez, 8, 1.ª planta
28036 Madrid
Tel. 912 776 400
Fax 914 097 046

Cataluña:
QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.ª Claret, 281 4.º 3.ª
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Luis Bou: *Control cerebral de robots* y *Aventuras problemáticas*; M.ª Rosa Zapatero Osorio: *Vacíos espaciales*; J. Vilardell: *Sistemas técnicos de alerta contra el bioterrorismo, Defensa y vigilancia, Hace...*, *Ideas aplicadas* y *Apuntes*; Esteban Santiago: *Evolución del color de la piel humana*; Juan P. Adrados: *Pararrayos en nanoelectrónica*; Joandomènec Ros: *Tiburones de agua dulce, actuales y fósiles*; Jürgen Goicoechea: *Curiosidades de la física* y *Apuntes*



Portada: Cortesía de General Motors

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 914 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	55,00 euro	100,00 euro
Extranjero	80,00 euro	150,00 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 5,00 euro
Extraordinario: 6,00 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

LA CURIOSA CONDUCTA DE LOS ESPINOSOS. «La vida sexual de los espinosos (*Gasterosteus aculeatus*) obedece a unas pautas complejas, puramente instintivas y automáticas, observables y manipulables casi a voluntad. Un resultado que ahora empieza a hacérsenos patente merced a los experimentos con los espinosos es que los mamíferos constituyen en muchos aspectos un grupo excepcional, especializado en el comportamiento 'plástico'. La conducta sencilla y más rígida de nuestro pez parece ser la norma en la mayor parte del reino animal. Por consiguiente, cabe esperar que la conducta plástica de los mamíferos tenga una base innata. Así, el estudio de los impulsos conflictivos en un animal tan inferior como el espinoso podría arrojar luz sobre los conflictos humanos y la naturaleza de las neurosis. —N. Tinbergen» [*Nota de la redacción: Nikolaas Tinbergen ganó el premio Nobel de fisiología y medicina de 1973 por sus investigaciones sobre la conducta social.*]

HISTORIA DE LA PATATA. «Es en Irlanda, la clásica tierra de la patata, donde se hallan las pruebas más evidentes de la influencia que un producto alimenticio barato y nutritivo puede ejercer en una sociedad. La patata arribó a Irlanda en 1588. Durante los siglos siguientes, ¡cuántas veces no oiríamos hablar de la patata como del salvavidas del pueblo, el fiable baluarte ante las siempre fallidas cosechas de cereal! A inicios del siglo XIX, las malas cosechas de patatas alertaron a muchos; se imponía extender la idea de que ni los campesinos ni el gobierno fiasen tanto en el tubérculo. Demasiado tarde: en 1845 y 1846 el hongo *Phytophthora infestans*, hasta entonces desconocido, arruinó la cosecha y sobrevino la Gran Hambruna. —Redcliffe N. Salaman, autor de 'Historia e Influencia Social de la Patata'.»

...cien años

THOMAS ALVA EDISON. «Con la introducción comercial de un tipo radicalmente nuevo de batería de almacenamiento, la atención pública vuelve a centrarse en el hombre que más ha hecho en nuestra época por aplicar la electricidad a las necesidades de la vida cotidiana. No hay instrumento eléctrico, ni proceso eléctrico en uso, que no lleve la impronta de algún gran cambio forjado por el más ingenioso de los americanos (*véase ilustración*). 'El genio es un dos por ciento de inspiración y un noventa y ocho por ciento de transpiración', es la incisiva y epigramática respuesta que Edison dio en cierta ocasión.»

VALORES PAISAJÍSTICOS. «El valor de las cataratas se ha incrementado extraordinariamente con la era de la electricidad, según *Mining and Scientific Press*. Hubo un tiempo en que las cataratas tenían sólo valor como paisajes, pero ahora son útiles además de pintorescas. Las del Niágara valen mil millones de dólares más como fuente de energía eléctrica que como simple vista.»



Thomas Alva Edison: genio de la invención, 1902

JAPÓN Y LAS PATENTES AMERICANAS. «Hará unos tres años, el gobierno japonés envió a Estados Unidos a un tal señor Takahashi para que estudiara nuestro sistema de patentes. El señor Takahashi rinde un entusiasta y peculiar tributo al sistema americano. 'Vimos a EE.UU., con sus apenas más de cien años de existencia', dijo, 'y nos preguntamos, ¿qué hace de EE.UU. una gran nación? Investigamos, y descubrimos que se debía a las patentes, y por eso [en Japón] tendremos patentes.'»

...ciento cincuenta años

LA TUBERCULOSIS SE EXTIENDE. «La consunción es la enfermedad más frecuente en Gran Bretaña, los estados americanos de Nueva Inglaterra y la casi totalidad del estado de Nueva York; sus víctimas son los jóvenes y agraciados. No tiene consideración al rango social; prefiere como víctimas, antes que a los hijos de los pobres, a los que, por su riqueza, más felices viven y ajenos son a las tribulaciones comunes. El doctor Burnett, de Boston, atribuye la frecuencia de la tisis en los estados de Nueva Inglaterra a la rigurosidad de su variable clima, cuya tendencia es dañar los órganos pulmonares.»

VOLCANES. «La opinión casi general entre los autores que los han estudiado es que, de algún modo, el agua interviene como agente activo en todas las erupciones volcánicas. El agua, empero, con toda probabilidad, no ejerce acción alguna; un argumento sólido a favor de ello es que en la Luna no hay atmósfera ni agua, y sin embargo los volcanes terrestres son meros enanos comparados con los de nuestro satélite.»

GENETICA

La homosexualidad en las moscas

El chasquido de un termostato hizo que las alas de moscas de la fruta machos se agitaran, atraídas por otros machos. Por investigación genética se sabía que las preferencias sexuales de *Drosophila* estaban prefijadas en su constitución hereditaria. Pero seguían sin conocerse los circuitos cerebrales que intervenían en esa determinación. El neurólogo Toshihiro Kitamoto, del Instituto de Investigaciones Beckman de la Ciudad de la Esperanza, en Duarte (California), y sus colaboradores implantaron en los insectos un gen mutante sensible al calor. Afectaba a neuronas concretas, entre ellas las células gustativas de la cabeza y las patas. Al calentarlo a 30 grados, el gen mutante alteró la actividad neurotransmisora; los machos comenzaron a cortejar a los machos, e incluso a intentar la copulación. Reanudaron sus cortejos heterosexuales al enfriarse la temperatura. Sospecha Kitamoto que, en condiciones normales, la conducta homosexual se suprime en cuanto las neuronas gustativas detectan las feromonas antiafrodisíacas del macho. *—Charles Choi*



Al cortejarse, los machos de la mosca de la fruta forman un corro

ASTRONOMIA

Luz de ida y vuelta

Si ilumináramos con una linterna un agujero negro, ¿qué veríamos? La intensa gravedad del agujero torcería parte de los rayos hasta el punto de que volverían hacia nosotros. Recibiríamos una imagen mortecina y deformada de nuestra linterna. Durante mucho tiempo, se ha considerado este ejemplo extremo de lente gravitatoria como una mera curiosidad —es uno de los ejercicios propuestos en un libro de texto de teoría de la relatividad—. Daniel E. Holz, de la Universidad de California en Santa Bárbara, y John A. Wheeler, de la Universidad de Princeton, a quien, por cierto, se debe la expresión "agujero negro", sostienen que el Sol podría hacer de linterna. Un agujero negro cercano al sistema solar produciría una imagen muy tenue del astro en el cielo nocturno. Cabría captar esa imagen, que aparecería durante varías horas y se repetiría una vez al año, mediante búsquedas sucesivas de microlentes gravitatorias. Supondría la más sólida prueba de la teoría de Einstein bajo las radicales condiciones de un agujero negro. *—George Musser*



Tirabuzón: la luz solar podría dar una vuelta en torno a un agujero negro y regresar a la Tierra

BIOLOGIA

Fusión celular

Las células pueden pasarse toda una vida herméticas las unas para las otras, por cerca que estén. Cuando las membranas se fusionan, eso sí, el proceso se torna asunto de vida o muerte, lo mismo que cuando se fecunda un óvulo o se produce una infección vírica. El detalle del entrelazamiento de las finísimas membranas celulares ha escapado a las más precisas observaciones. En el Laboratorio Nacional de Brookhaven y de la Universidad Rice lo han vislumbrado por azar. Iluminaron con rayos X unas pilas de membranas deshidratadas; las imágenes de sus estructuras atómicas revelaron unas conformaciones, recordaban a relojes de arena, que unían las superficies. Hacía tiempo que se conjeturaba que ciertas estructuras de vida corta, los pedúnculos, se estiraban para formar puentes por los cuales fluía el ADN. Los datos confirman esa tesis. Podrían contribuir a la mejora de la terapia genética y a un mayor refinamiento de las técnicas de administración de fármacos. *—Charles Choi*



Las membranas se funden cuando el espermatozoide incide en el óvulo

TOSHIHIRO KITAMOTO (*arriba*); ALICIA CALLE (*centro*); D. PHILLIPS *Photo Researchers, Inc.* (*abajo*)

ASTRONOMIA

Choque de galaxias



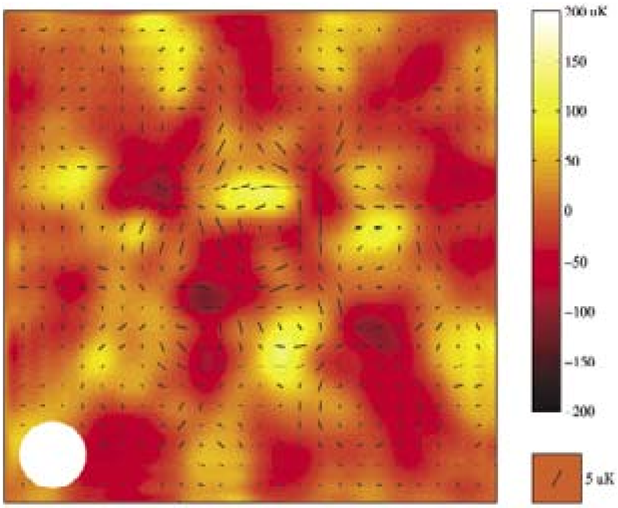
Esta imagen de las galaxias NGC 4038/39 fue tomada por Vimos, el nuevo Espectrógrafo de Luz Visible para Múltiples Objetos, instrumento instalado en el Telescopio Melipal del Observatorio Meridional Europeo. Colisionaron hace poco. A ambas se las ve deformadas por fuerzas de marea extremas. El choque violento provocó intensos brotes de nacimientos de estrellas en las zonas que aquí aparecen como manchas verdosas; en ellas el número de estrellas jóvenes, calientes y de gran masa es muy elevado.

—*T. A.*

ASTROFISICA

Polarización de la radiación cósmica de fondo

El pasado 19 de septiembre, miembros de la colaboración DASI (el interferómetro de escala angular de un grado) anunciaron un descubrimiento importante: la radiación cósmica de fondo de microondas (RCFM) está ligeramente polarizada. Este es un efecto que se venía buscando desde 1968, año en que Martin Rees predijo su existencia. Una radiación está polarizada linealmente cuando los campos eléctricos y magnéticos que la componen oscilan en una dirección determinada. La temperatura de la RCFM va ligada a su espectro, a la distribución de la energía total entre las frecuencias de oscilación de los campos que la componen; coincide con la que tendría un cuerpo negro que emitiese el mismo espectro. Las diminutas variaciones (o anisotropías) de la temperatura de la RCFM se muestran por medio de colores artificiales en este mapa de una región del cielo. El amarillo corresponde a zonas mas calientes y el rojo a zonas más frías que la temperatura media. El grado de polarización detectado es del orden de un 10 % de la magnitud de las diferencias de temperatura. Se representa con rayas negras. La longitud de cada una muestra la amplitud del efecto, mientras que la orientación indica la dirección en que la radiación está polarizada. El círculo blanco de la esquina da la resolución angular del experimento. Las actuales irregularidades de la temperatura de la RCFM se correlacionan con parejas irregularidades de la densidad de masa en los primeros tiempos del universo (la fuerza de gravedad de una acumulación de materia modifica la frecuencia de la luz). La radiación tiende a polarizarse cuando la dispersan electrones, de una manera que refleja los movimientos de éstos. Por ello, la mayor importancia del hallazgo radica en que no sólo es una muestra de las inhomogeneidades presentes cuando el universo contaba con unos 400.000 años de vida, sino que además nos informa sobre cómo se movían los grumos primordiales en aquellas épocas remotas. El descubrimiento reafirma el marco teórico de la cosmología actual y respalda la existencia de una fase inflacionaria en el origen del universo, durante la cual se expandió a un ritmo rapidísimo.



El mapa abarca 5 grados cuadrados

—*Alejandro Gangui*

CIENCIA DE LOS MATERIALES

Diamantes semiconductores

En teoría, los diamantes son semiconductores ideales. Poseen la misma estructura cristalina que el silicio, pero soportan campos eléctricos más intensos y funcionan con bandas más anchas y a temperaturas más altas. Pero presentan un inconveniente: los diamantes naturales no son tan puros; hasta los que causarían la admiración de los tasadores más exigentes muestran excesivas imperfecciones microscópicas que impiden el movimiento libre de las cargas. Los diamantes artificiales, que se fabrican depositando carbono vaporizado sobre un sustrato, son mejores, pero no han conseguido la pureza y el tamaño requeridos. Ahora, merced a un control esmerado de las condiciones ambientales, unos investigadores suecos y británicos, encabezados por Jan Isberg, de Upsala, han construido diamantes artificiales donde la movilidad de las cargas casi dobla la conocida. Como señal alentadora para la electrónica del carbono, la de las cargas positivas superaba incluso a la de los electrones de los semiconductores de carburo de silicio y nitruro de galio. Una mayor movilidad se traduce, de manera aproximada, en pérdidas menores y tiempos de conmutación más rápidos.



Insuperables en la joyería, pero no lo bastante buenos para los circuitos, aún

—*J. R. Minkel*

EUROPEAN SOUTHERN OBSERVATORY (*arriba*); ECOLABORACION DASY (*centro*); L. CLARKE *Corbis* (*abajo*)



Control cerebral de robots

Tal vez, algún día, quienes sufren lesiones nerviosas o parálisis lleguen a gobernar sillas de ruedas, prótesis e incluso extremidades paralizadas con sólo pensar sus movimientos

Miguel A. L. Nicolelis y John K. Chapin

Estaba Belle, nuestra monita nocturna, sentada en su silla especial, dentro de una cámara insonorizada de nuestro laboratorio de la Universidad Duke. Su mano derecha asía un mando, al tiempo que observaba en un panel una serie horizontal de luces. Belle sabía que si, al encenderse de pronto una luz, desplazaba el mando hacia la derecha o la izquierda, en correspondencia con la posición de la luz, un dispensador dejaría caer en su boca una gota de zumo. Le encantaba este juego. Y era muy diestra en él.

Lucía un casquete adherido a la cabeza. Debajo de él, cuatro conectores de plástico le introducían sendos haces de conductores eléctricos, más delgados que el más sutil hilo de coser, en diversas regiones de la corteza motriz, el tejido cerebral que planifica los movimientos y envía a la médula espinal las instrucciones para llevarlos a efecto. Cada uno de aquellos 100 microhílos estaba emplazado junto a una sola neurona motriz. Cuando ésta generaba una descarga eléctrica, un "potencial de acción", el microelectrodo contiguo captaba la señal eléctrica y un pequeño mazo de cables la transmitía desde el casquete de Belle hasta un sistema electrónico instalado en una mesa cercana al cubículo. Ese sistema se hallaba, a su vez, conectado a dos ordenadores, uno en la habitación contigua, el otro, a medio país de distancia de allí.

Más lejos, en otra abarrotada dependencia del edificio, los miembros de nuestro equipo de investigación sufrían, ansiosos. Tras meses de duro trabajo, estábamos a punto de comprobar si era posible traducir fielmente la actividad eléctrica bruta del cerebro de un ser vivo —los pensamientos de Belle en estado puro— en señales capaces de dirigir las acciones de un robot. Belle ignoraba, en aquel primaveral mediodía del año 2000, que habíamos ensamblado en esa dependencia un brazo robótico multiarticulado; no estaba al alcance de su vista; sin embargo iba a controlarlo por vez primera. En cuanto el cerebro de Belle percibiera un punto luminoso en el panel, el sistema electrónico, que ejecutaba en tiempo real dos modelos matemáticos, analizaría los diminutos potenciales eléctricos generados por sus neuronas cerebrales. El ordenador de nuestro laboratorio convertiría las pautas eléctricas en instrucciones que dirigirían el brazo robótico. Mil kilómetros al norte, en Cambridge (Massachusetts), un segundo computador ordenaría las mismas acciones a otro brazo robótico, construido por Mandayam A. Srinivasan, director del laboratorio de háptica humana y maquinal del Instituto de Tecnología de Massachusetts. Al menos, tal era el plan.

Si todo se había realizado correctamente, los dos brazos robóticos iban a actuar exactamente igual que el brazo de Belle, y justo al mismo tiempo. Traduciríamos su actividad neuronal en órdenes para los robots en sólo 300 milisegundos; ese lapso era la demora natural entre el momento en que la corteza cerebral de Belle planeaba cómo iba a mover su propio brazo y el momento en que enviaba las instrucciones a los músculos. Si el cerebro de una criatura viva podía controlar con precisión dos brazos robóticos disímiles, a pesar del ruido de la señal, de las demoras de transmisión inherentes a la red informática de nuestro laboratorio y de los fallos de transmisión de Internet, cabía dentro de lo posible que algún día controlase un dispositivo mecánico, o auténticas extremidades humanas, de formas útiles.

Llegó por fin el momento. Fuimos encendiendo al azar distintas luces delante de Belle. Esta movía en el acto el mando a un lado u otro, según correspondiera. Nuestro brazo robótico se movió parejamente al brazo real de Belle. Y lo mismo el montado por Srinivasan. Belle y los robots se movieron sincrónicamente: los impulsos eléctricos que chispeaban en la mente de la mona dirigían ese ballet. En el jubiloso clamor de Durham y de Cambridge, no pudimos dejar de pensar que ése era sólo el principio de un viaje lleno de promesas.

En los dos años transcurridos desde aquel día, nuestro laboratorio y varios más han hecho progresar la neurología, la informática, la microelectrónica y la robótica a fin de crear maneras de que las ratas, los monos y, en última instancia, los seres humanos puedan controlar máquinas mecánicas o electrónicas por pura "conceptualización" o "imaginación" de los movimientos necesarios. Nuestro objetivo inmediato es ayudar a quienes han quedado paralíticos a causa de una enfermedad nerviosa o de una lesión de la médula espinal, pero todavía cuentan con una corteza motriz intacta, a gobernar una silla de ruedas o un miembro mecánico. Algún día tales investigaciones podrían también contribuir a que esos pacientes recuperen el control de uno de sus brazos o piernas mediante la comunicación inalámbrica entre implantes efectuados en el cerebro y en el miembro afectado. Y podrían llevar también a la creación de dispositivos que restituyan o potencien otras funciones motoras, sensoriales o cognitivas.

La cuestión fundamental es si conseguiremos construir un sistema práctico y fiable. La medicina carece hoy de medios para curar roturas de la médula espinal o lesiones cerebrales. Tal vez, en un futuro distante, logre la neurología la regeneración de neuronas lesionadas, o la programación de las células madre, susceptibles de diferenciación en células de diversos tipos, para que ocupen el lugar de aquéllas. Pero en el futuro previsible parece que las neuroprótesis, también denominadas "interfaces cerebro-máquina", constituirán una opción más viable para la restauración de la función motriz. El éxito obtenido el pasado verano con macacos que llevaron a cabo tareas diferentes de las solicitadas a Belle nos ha acercado todavía más a dicha meta.

BELLE, UNA MONA NOCTURNA, encaramada al brazo robótico que logró controlar desde otra dependencia distante imaginando que era su propio brazo el que se movía a través del espacio tridimensional.

JIM WALLACE, Fotografía de la Universidad de Duke

De la teoría a la práctica

Los progresos recientes en interfaces cerebro-máquina (ICM) se fundan, en parte, en descubrimientos de hace unos 20 años. A principios del dece-

nio de 1980, Apostolos P. Georgopoulos, de la Universidad Johns Hopkins, registró la actividad eléctrica de neuronas individuales de la corteza motriz de monos macacos. Descubrió que las neuronas reaccionaban, de ordinario, con máxima intensidad cuando el mono movía el brazo en una determinada dirección. Mas cuando el brazo se movía en un ángulo distinto al de la dirección preferente de la neurona, la actividad no cesaba, sino que disminuía en proporción al coseno de dicho ángulo. El descubrimiento puso de manifiesto que las neuronas estaban sintonizadas, en términos generales, para ejecutar un determinado repertorio de movimientos; era muy probable que el cerebro se apoyase en la actividad colectiva de poblaciones dispersas de neuronas individuales para generar una orden motriz.

No faltaban las objeciones. Georgopoulos había registrado la actividad de neuronas individuales, una por vez, pertenecientes a una sola área motora. Este método dejaba sin demostración la hipótesis de fondo, según la cual surgía algún tipo de codificación de la actividad simultánea de muchas neuronas distribuidas por múltiples áreas corticales. Era sabido que los lóbulos frontal y parietal (ubicados en las regiones delantera y posterior del cerebro, respectivamente) interactuaban en la planificación y generación de órdenes motoras. Pero las limitaciones de la técnica disponible hacían imposible tomar extensos registros simultáneos. Además, la mayoría opinaba que, si se catalogaban las propiedades de las neuronas, una por vez, se podría cartografiar plenamente el funcionamiento del cerebro, ¡como si la lista de las características de cada uno de sus árboles pudiera desvelar la estructura ecológica de un bosque completo!

Por fortuna, algunos discrepaban. Cuando los dos autores nos conocimos, hace 14 años, en la Universidad Hahnemann, hablamos de la posibilidad de registrar simultáneamente la actividad de muchas neuronas individuales. Hacia 1993, nuestros progresos técnicos nos habían permitido registrar 48 neuronas dispersas a través de cinco estructuras que forman el sistema sensorio-motor de una rata, es decir, de las regiones cerebrales que perciben y utilizan información procedente de los sentidos con el fin de dirigir los movimientos.

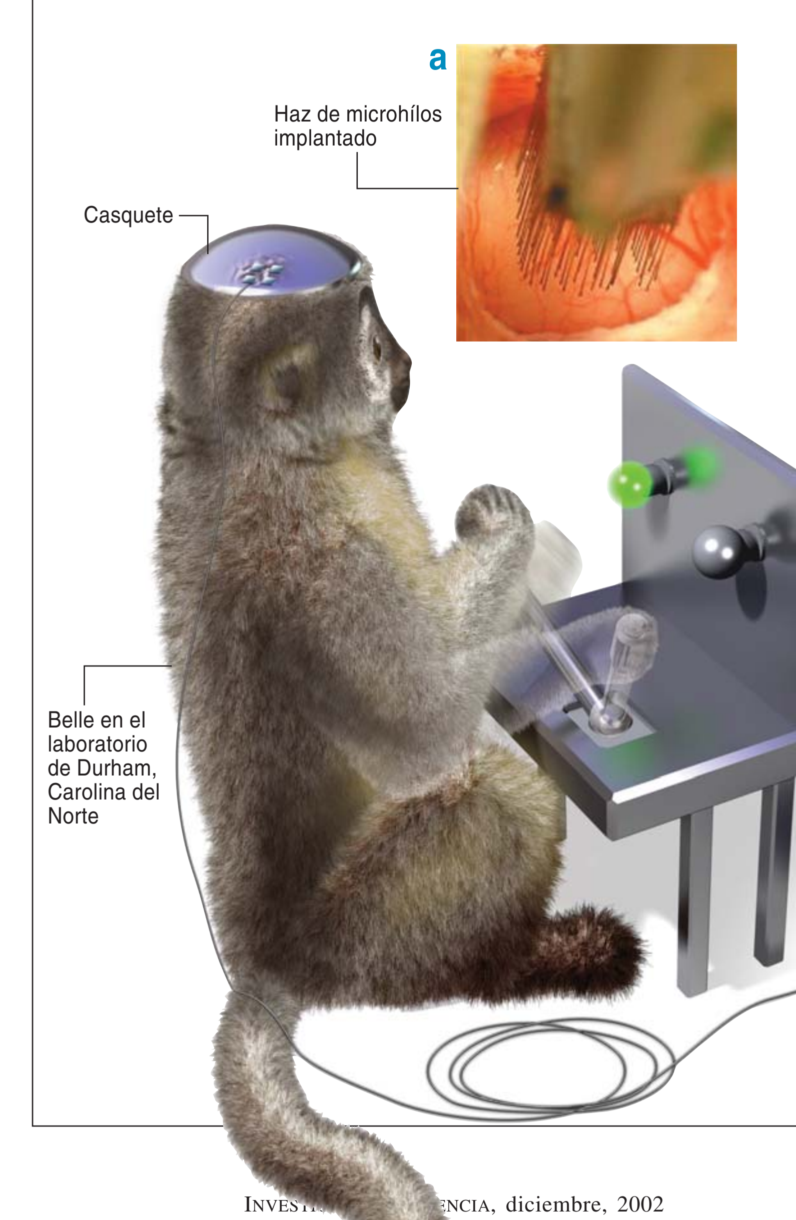
Para nuestros éxitos de entonces —y los que hemos tenido después—, resultaron cruciales nuevos haces de electrodos provistos de microhílos de acero inoxidable revestidos de teflón, susceptibles de implantación en el cerebro de un animal. Con anterioridad, la actividad de neuronas individuales se registraba por medio de electrodos aciculares rígidos. Funcionaban bien, pero sólo durante algunas horas, porque se iban agregando componentes celulares en torno a la punta y

Resumen/*Interfaces cerebrales*

- Ratas y monos, cuyo cerebro se hallaba conectado con hilos eléctricos a un ordenador, han logrado controlar palancas y brazos robotizados imaginando que una de sus patas accionaba una barra o manipulaba un mando.
- Estas proezas han resultado posibles merced a unos microhílos susceptibles de implantarse en la corteza motriz y a algoritmos que traducen la actividad eléctrica de las neuronas cerebrales en órdenes que controlan dispositivos mecánicos.
- Ensayar en seres humanos interfaces cerebro-máquina constituye todavía un futurible. Pero, a largo plazo, éstas podrían ayudar a los mancos a controlar con la mente una prótesis robótica o a quienes han sufrido lesiones de la médula espinal a recobrar el control de miembros paralizados.

Belle extiende el brazo a 1000 kiló

El día en que Belle accionó por vez primera un brazo robótico poliarticulado mediante el pensamiento iba tocada con un casquete pegado a la cabeza. Cuatro conectores de plástico, por dentro del casquete, alimentaban un haz de finos microhílos insertos en la corteza cerebral (*a*). Cuando Belle veía encenderse de pronto una luz e inclinaba, en consonancia con su posición, un mando hacia la derecha o la izquierda, los microhílos detectaban señales eléctricas producidas por neuronas activadas en la



acababan por inutilizarlo eléctricamente. Además, debido a su rigidez, los leves movimientos del cerebro del sujeto durante la actividad normal producían lesiones en las neuronas. Los microelectrodos flexibles que diseñamos en nuestro laboratorio (luego fabricados por NBLabs, en Denison, Texas) tenían puntas más romas, de unas 50 micras de diámetro, y eran mucho más flexibles. Las sustancias celulares ya no sellaban sus extremos; su flexibilidad evitaba en buena medida las lesiones neuronales. Estas propiedades nos permitieron finalmente obtener registros durante meses. Al disponer de instrumentos de registro fiables, pudimos desarrollar sistemas que tradujeran las señales cerebrales en órdenes capaces de controlar un dispositivo mecánico.

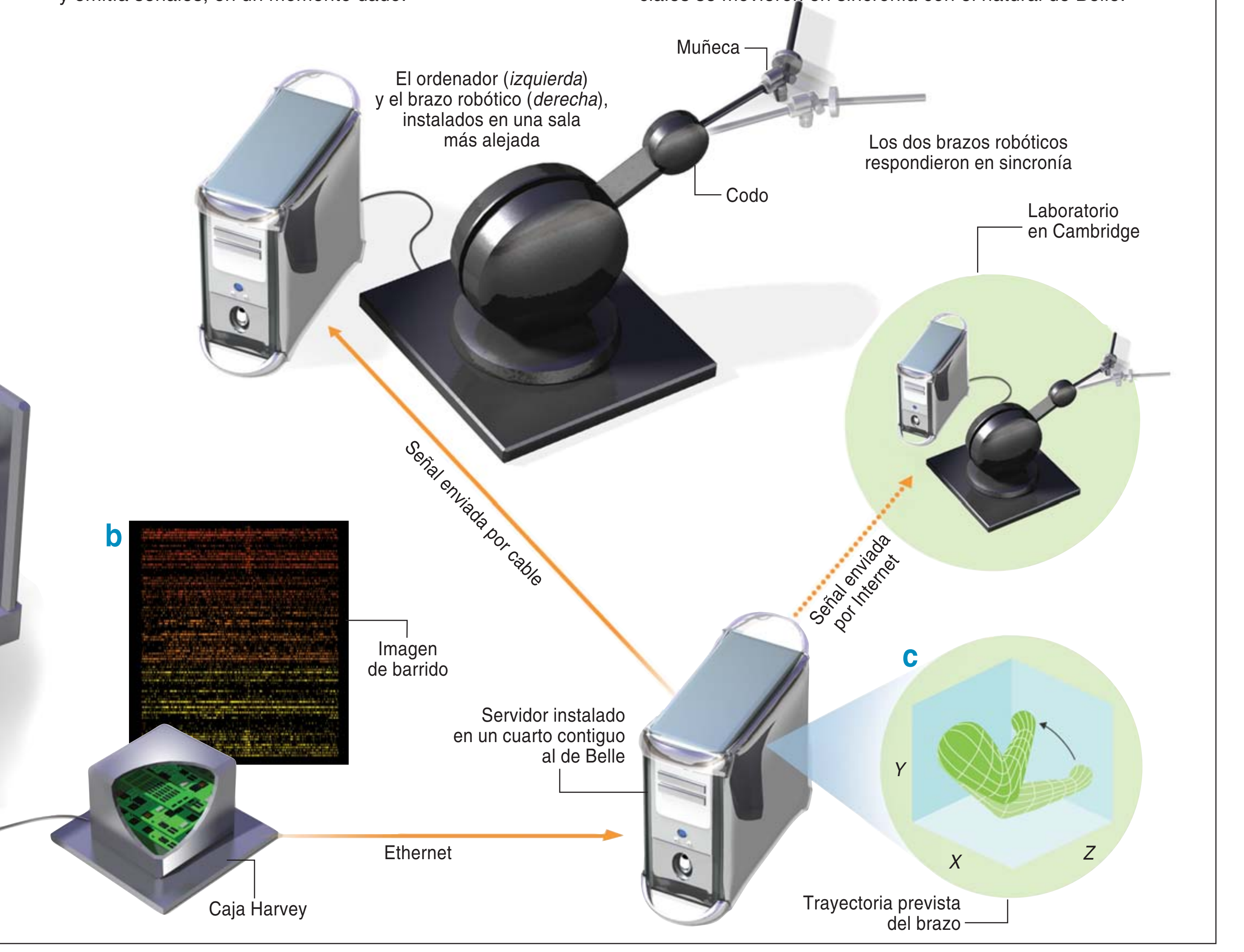
En colaboración con Harvey Wiggins, ingeniero eléctrico, en la actualidad presidente de Plexon, empresa de Dallas, y Donald J. Woodward y Samuel A. Deadwyler, de la facultad de medicina de la Universidad Wake Forest, ideamos un sistema electrónico *ad hoc*, una pequeña "caja Harvey", como la instalada junto al cubículo de Belle. Se trataba del primer equipo capaz

metros de distancia

corteza motriz; las señales se transmitían a una "caja Harvey" de circuitos electrónicos.

La caja recogía, filtraba y amplificaba las señales, y las retransmitía a un ordenador servidor, situado en una dependencia contigua. Las señales recogidas por la caja se representan en un gráfico de barrido (*b*); cada hilera muestra el registro de la actividad de una única neurona en el transcurso del tiempo; cada barra de color indica que la neurona estaba excitada, y emitía señales, en un momento dado.

El ordenador, a su vez, pronosticaba la trayectoria que iba a seguir el brazo de Belle (*c*) y convertía esa información en órdenes que reprodujesen tales movimientos en un brazo robótico, para a continuación remitirlas a otro ordenador, instalado en una sala más alejada, que controlaba al brazo robótico. Al mismo tiempo las enviaba, desde nuestro laboratorio de Durham, a un segundo brazo artificial situado a mil kilómetros de distancia. En respuesta a tales órdenes, ambos brazos artificiales se movieron en sincronía con el natural de Belle.



BRYAN CHRISTIE DESIGN

de muestrear, filtrar y amplificar señales nerviosas procedentes de muchos electrodos. Por medio de programas informáticos específicos, nos fue posible discriminar la actividad eléctrica de hasta cuatro neuronas por microhílo mediante la identificación de las características peculiares de la descarga eléctrica de cada célula.

El cerebro de una rata controla una palanca

En nuestros siguientes experimentos, llevados a cabo en Hahnemann a mediados de los años noventa, le enseñamos a una rata enjaulada a controlar con la mente una palanca. La rata fue, en primer lugar, adiestrada para que accionase una barra con la pata delantera. La barra estaba conectada electrónicamente a la palanca, situada en el exterior. Cuando la rata pulsaba la barra, la palanca basculaba y dejaba caer una gota de agua, que el roedor bebía.

Instalamos en la cabeza de la rata una versión reducida de la interfaz cerebro-máquina que más adelante iba a usar Belle. Cada vez que le ordenaba a su pata que pulsara la barra, procedíamos a registrar simultáneamente los potenciales de acción generados por 46 neuronas. Habíamos programado una red de resistencias de modo que constituyesen un "integrador"; ponderaba y procesaba los datos tomados de las neuronas con el objeto de generar una única señal analógica de salida, que predecía muy bien la trayectoria de la pata del animal. Conectamos este integrador al controlador de la palanca robotizada para que lo gobernase.

Una vez que la rata se hubo acostumbrado a obtener el agua pulsando la barra, desconectamos ésta de la palanca. La rata pulsaba la barra, pero la palanca permanecía inmóvil. Frustrada, pulsaba repetidas veces la barra, inútilmente, claro está. Pero en una ocasión la palanca osciló y le proporcionó agua. La rata lo ignoraba, pero sus 46 neuronas habían expresado la misma pauta de excitaciones que en tentativas anteriores, cuando el pulsador todavía funcionaba. Tal patrón de excitaciones fue el causante de que el integrador pusiera el brazo en movimiento.

Los autores

MIGUEL A. NICOLELIS y JOHN K. CHAPIN llevan colaborando más de diez años. Nicolelis, originario de Brasil, se licenció en medicina y se doctoró en neurofisiología en la Universidad de São Paulo. Tras realizar investigaciones posdoctorales en la Universidad Hahnemann, ingresó en la Universidad Duke, donde es codirector del Centro de Neuroingeniería y profesor de neurobiología. Chapin se doctoró en neurofisiología en la Universidad de Rochester y ha ocupado diversos puestos docentes en la Universidad de Texas y en la facultad de medicina de la Universidad Hahnemann (en la actualidad facultad de medicina de la Universidad Drexel). Enseña fisiología y farmacología en el Hospital Clínico Universitario del Sur del estado de Nueva York.

Al cabo de varias horas, la rata había comprendido que ya no necesitaba pulsar la barra. Si se limitaba a mirarla y a imaginar que la pulsaba con la pata, sus neuronas todavía expresaban el patrón de excitación que nuestra interfaz cerebro-máquina interpretaba como una orden de accionar la palanca. Con el tiempo, cuatro de seis ratas tuvieron éxito en esta tarea. Aprendieron que debían "pensar de cabo a rabo" el movimiento de pulsación de la barra. No es tan mágico como parece: usted mismo, en este momento, puede imaginar que tiende la mano para asir algún objeto cercano, sin hacerlo realmente. De igual manera, una persona que hubiera sufrido la amputación de un miembro, o lo tuviera incapacitado, podría aprender a controlar con el pensamiento un brazo robótico conectado al hombro.

El cerebro de un mono controla un brazo robótico

Los éxitos obtenidos con nuestras ratas no sólo nos dejaron impresionados e ilusionados; nos alentaron a ir más allá y tratar de reproducir con un brazo robótico los movimientos tridimensionales que realizan con las manos los monos, animales cuyos cerebros se parecen mucho más a los humanos. El primer paso consistió en idear métodos y técnicas para pronosticar cómo se proponía el mono mover sus brazos naturales.

En este punto, uno de los autores (Nicolelis) se trasladó a la Universidad Duke y estableció allí un laboratorio de neurofisiología. Entre ambos construimos una interfaz capaz de supervisar simultáneamente casi un centenar de neuronas, repartidas por los lóbulos parietal y temporal. A continuación, la ensayamos con varios monos nocturnos. Optamos por estos monos porque sus áreas corticales motoras se hallan situadas sobre la superficie de su cerebro liso, disposición que minimiza la dificultad quirúrgica de la implantación de haces de microelectrodos. Estos haces nos permitieron registrar los potenciales de acción en el cerebro de cada animal durante varios meses.

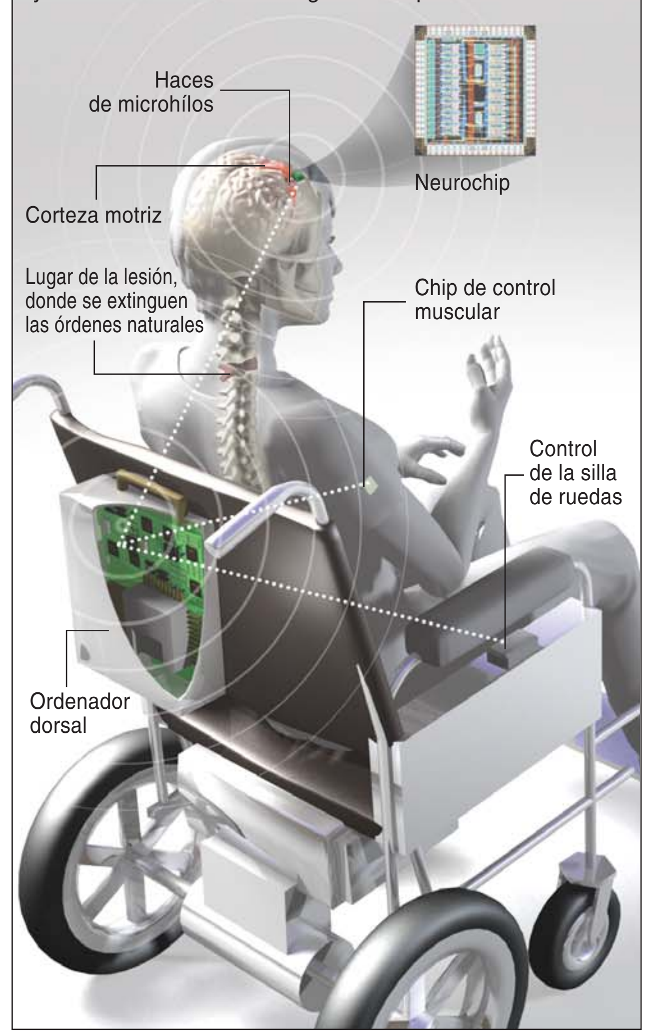
En nuestros primeros experimentos, les exigimos a los monos nocturnos, Belle incluida, que inclinasen un mando —un *joystick*— hacia la derecha o la izquierda cuando vieran encenderse una luz en el correspondiente lado de una pantalla de vídeo. Más adelante los sentamos en una silla frente a una barrera opaca. Cuando levantábamos la barrera, veían una pieza de fruta en una bandeja. Tenían que alargar la mano y asir la fruta, llevársela a la boca y devolver la mano a la posición inicial. Medimos la posición de la muñeca de cada mono dotándola de sensores de fibra óptica, que definían su trayectoria.

Un análisis ulterior reveló que la simple adición lineal de la actividad eléctrica de la muestra de neuronas corticales motrices pronosticaba muy bien la posición de la mano del animal con unos cientos de milésimas de segundo de anticipación. Este descubrimiento fue obra de Johann Wesberg, hoy en la Universidad de Goteburgo, en Suecia. La clave estribaba en que el ordenador combinase continuamente la acti-

Una visión de futuro

LAS INTERFACES CEREBRO-MÁQUINA podrían algún día ayudar a quienes sufren parálisis de sus extremidades por tener lesionada la médula espinal. Diminutos haces de microhílos implantados en múltiples áreas de la corteza motriz del cerebro podrían conectarse a un neurochip instalado en el cráneo. Conforme la persona imaginase que su brazo paralizado debería moverse en una determinada dirección —por ejemplo, para tomar alimento de una mesa—, el microcircuito iría convirtiendo los pensamientos en un tren de señales en radiofrecuencias, que enviaría, vía inalámbrica, a un pequeño ordenador "de mochila" alimentado por baterías y sujeto al respaldo de la silla.

El ordenador se encargaría de convertir las señales en órdenes motrices y de despacharlas, por vía inalámbrica de nuevo, hasta otro microchip implantado en el brazo del sujeto. Este segundo microcircuito se encargaría de estimular los nervios necesarios para accionar los músculos del brazo en la forma debida. Otra posibilidad sería que el ordenador controlara los motores de la silla y la pilotara directamente, llevándola adonde la persona se hubiese propuesto. O quizás el ordenador podría enviar señales a un brazo robótico que sustituyese a uno natural, o instalado en la silla. Patrick D. Wolf, de la Universidad Duke, ha construido un prototipo de neurochip y de mochila como los imaginados aquí.



BRYAN CHRISTIE DESIGN

vidad neuronal producida a lo largo de un período muy largo, de hasta un segundo, para pronosticar mejor en tiempo real los ulteriores movimientos.

Prosiguiendo con nuestro trabajo científico, adquirimos a Plexon una caja Harvey más perfecta. Con ella y ciertos algoritmos "hechos a la medida" que operaban en tiempo real, nuestro ordenador tomaba muestras de los potenciales de acción y los integraba cada 50 o 100 milisegundos. Los programas convertían los resultados en instrucciones aptas para gobernar en el espacio tridimensional las acciones de un brazo robótico. Sólo entonces nos decidimos a utilizar una interfaz cerebro-máquina para controlar un dispositivo robótico. Mientras contemplábamos, en aquella exaltadora tarde del año 2000, cómo nuestro brazo poliarticulado robotizado remedaba con precisión los movimientos del brazo de Belle, no podíamos dejar de sentir cuán asombroso resultaba. Con tan sólo 50 o 100 neuronas, seleccionadas al azar entre decenas de millones, se estaba realizando el trabajo requerido.

Análisis matemáticos posteriores revelaron que la precisión de los movimientos del robot era, más o menos, proporcional al número de neuronas registradas; pero esta relación lineal iba dejando de cumplirse conforme tal número aumentaba. Con un muestreo de 100 neuronas podíamos crear trayectorias de la mano robotizada que guardaban un 70 por ciento de semejanza con las de los monos. Un análisis ulterior arrojó que para conseguir una precisión de un 95 por ciento en la predicción de los movimientos unidimensionales de la mano bastarían de 500 a 700 neuronas, en función de la región del cerebro que se muestrease. Estamos en la actualidad calculando el número de neuronas necesarias para lograr movimientos tridimensionales de alta precisión. Sospechamos que se contará, también, por centenas y no por millares.

Tales resultados inducen a pensar que en el seno de cada área cortical, el "mensaje" que define un determinado movimiento de la mano se encuentra ampliamente diseminado. Tal descentralización es sumamente beneficiosa para el animal: en caso de lesión, dispone de un enorme reservorio de redundancia. Para nosotros, los investigadores, significa que una neuroprótesis, una ICM, para personas con parálisis severas quizá requiera el muestreo de poblaciones de neuronas menores de lo que inicialmente se había supuesto.

Tras el feliz experimento con Belle, continuamos trabajando con ella y con nuestros otros monos. Descubrimos que conforme los animales iban perfeccionando su ejecución de las tareas, las propiedades de sus neuronas cambiaban, a lo largo de varios días e incluso en las dos horas que duraba cada sesión diaria de registro. La contribución de las neuronas individuales variaba con el tiempo. Para habérnoslas con este "aprendizaje motor," añadimos una sencilla rutina que habilitaba en nuestro modelo la evaluación periódica de la contribución de cada neurona. Las células cerebrales que dejaban de influir significativamente en el pronóstico se eliminaban del modelo; se añadían, en cambio, las que iban prediciendo mejor. Diseñamos, en esencia, una forma de extraer del cerebro una salida neuronal correspondiente a la trayectoria de la

mano. Esta codificación, junto con nuestra capacidad de medir neuronas con precisión durante largo tiempo, permitió a la interfaz representar fielmente, a lo largo de varios meses, los movimientos que Belle tenía intención de realizar. Podríamos haber continuado, pero disponíamos ya de los datos que necesitábamos.

Debe destacarse que la gradual modificación de la actividad eléctrica contribuye a proporcionar al cerebro su plasticidad. El número de potenciales de acción que genera una neurona antes de un movimiento dado va cambiando conforme el animal multiplica sus experiencias. Empero, la revisión dinámica de las propiedades neurales no constituye un impedimento para la construcción de ICM útiles. Lo bonito de una salida neuronal distribuida es que no depende de un pequeño grupo de neuronas. Si una ICM es capaz de mantener durante meses registros viables de varios cientos o millares de neuronas y de utilizar modelos capaces de aprender, podrá habérselas con la evolución de las neuronas, con la muerte neuronal e incluso con la degradación de la capacidad de grabación de los electrodos.

Realimentación de los sentidos

Belle demostró que una ICM funciona con un cerebro de primate. ¿Nos sería posible adaptar la interfaz a cerebros más complejos? En mayo de 2001 comenzamos en la Universidad Duke estudios con tres macacos, cuyo cerebro contiene profundos surcos y circunvoluciones que se parecen a los del cerebro humano.

Nos servimos entonces de la misma ICM que utilizó Belle, con una adición fundamental: los monos contaban ahora con una realimentación visual, que les permitía juzgar por sí mismos en qué medida lograba la ICM remedar el movimiento de sus manos. Los macacos movían en direcciones arbitrarias un mando; desplazaban así el cursor por la pantalla de un ordenador. De pronto, en algún lugar de la pantalla aparecía una diana redonda. Para merecer un sorbo de zumo de fruta, el mono tenía que situar rápidamente —en menos de medio segundo— el cursor dentro de la diana.

El primer macaco que llegó a dominar esta tarea fue Aurora, una hembra elegante que gustaba de exhibir la destreza que le hacía acertar con la diana más del 90 por ciento de las veces. Nuestros asociados posdoctorales Roy Crist y José Carmena registraron la actividad de 92 neuronas en cinco áreas parietales y frontales de la corteza de Aurora.

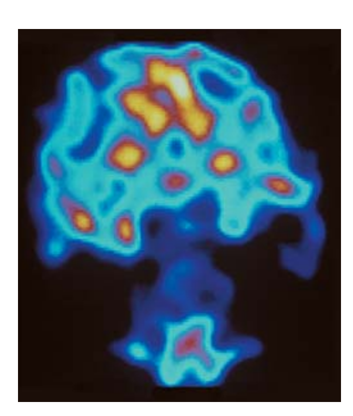
Una vez hubo adquirido maestría en el juego, le hicimos una jugarreta. En alrededor del 30 por ciento de los ensayos desactivamos la conexión entre el mando y el cursor. Para trasladar el cursor al interior de la diana, tenía que basarse exclusivamente en su actividad cerebral, procesada por nuestra ICM. Desconcertada al principio, fue modificando poco a poco su estrategia. Aunque seguía realizando movimientos con las manos, al cabo de algunos días había aprendido que podía mover el cursor el cien por cien de las veces sólo con el pensamiento. En las semanas siguientes, en unos cuantos ensayos de cada día no se molestó siquiera en mover la mano; para desplazar el cursor, le bastaba pensar la trayectoria que habría de seguir.

Pero eso no fue todo. Dado que Aurora podía ver lo que hacía en la pantalla, la ICM lograba predicciones cada vez más acertadas, incluso aunque registrase las mismas neuronas. Si bien es necesario un análisis mucho más completo para comprender este resultado, la explicación quizá sea que la realimentación visual contribuyó a que Aurora maximizara la reacción de la ICM, tanto en el aprendizaje de su cerebro como en

Prevención de ataques epilépticos

EXPERIMENTOS RECIENTES llevan a pensar que las interfaces cerebro-máquina (ICM) podrían ayudar a evitar los ataques cerebrales de quienes padecen de epilepsia crónica severa, mal que les hace sufrir docenas de crisis al día. Esta enfermedad arruina la vida del enfermo y en ocasiones provoca lesiones cerebrales permanentes. Para agravar las cosas, estos pacientes suelen dejar de responder a los tratamientos tradicionales con fármacos.

Una ICM para el control de tales crisis funcionaría de modo hasta cierto punto parecido al de un marcapasos. Se encargaría de vigilar continuamente la actividad eléctrica cerebral, en busca de patrones que indicasen la inminencia de un ataque. Cuando la ICM detectase uno de estos patrones, suministraría un impulso eléctrico, bien al cerebro, bien a un nervio periférico, que apaciguase la tormenta en formación o provocara la liberación de un medicamento antiepiléptico.



TOMOGRAFIA DEL CEREBRO, obtenida por emisión de positrones, durante un ataque epiléptico. Las regiones de excesiva actividad cerebral están coloreadas en amarillo.

Hemos demostrado en Duke la viabilidad de esta idea en colaboración con Erika E. Fanselow, actualmente en la Universidad Brown, y Ashlan P. Reid, de la Universidad de Pennsylvania. Implantamos una ICM con haces de microhílos en ratas a las que se había administrado PTZ, fármaco que induce una epilepsia leve y repetitiva. Al principio de una crisis, las neuronas corticales emiten señales conjuntamente, en oleadas muy sincrónicas. Cuando el "marcapasos" cerebral detectaba este patrón, desencadenaba la estimulación eléctrica del nervio trigémino craneal. Este breve estímulo perturbaba rápida y eficazmente la actividad epiléptica, sin lesionar el nervio, y reducía la frecuencia y duración de los ataques.

TIM BEDDON SPL/Photo Researchers, Inc.

el de la máquina. En caso de que esto fuera cierto, la realimentación sensorial, bien visual, bien de otro tipo, podría servirle a un ser humano para elevar el rendimiento de sus propias ICM.

Observamos otro resultado alentador. Ha transcurrido, en el momento de escribir estas páginas, más de un año desde que implantamos los microelectrodos en el cerebro de Aurora, y continuamos todavía registrando diariamente entre 60 y 70 neuronas. Tan prolongado éxito indica que, incluso en un primate dotado de un cerebro con circunvoluciones, nuestros haces de microhílos proporcionan señales multicanal, de alta calidad y larga duración. Aunque la muestra se ha reducido desde las 92 neuronas primitivas, el rendimiento de Aurora con la ICM sigue siendo el más alto que haya logrado.

Nos proponemos plantearle a Aurora tareas más difíciles. En mayo pasado empezamos a modificar la ICM a fin de proporcionar a la mona realimentación táctil en nuevos experimentos, que ya hemos iniciado. La ICM controlará un brazo robótico cercano, provisto de pinzas que simulan una mano capaz de asir. Sensores de fuerza indicarán en qué momento encuentran las pinzas un objeto y cuánta fuerza es necesaria para asirlo. Se aportará la realimentación táctil —¿es el objeto pesado o liviano, resbaladizo o pegajoso?— mediante un parche implantado en la piel del animal y provisto de unos diminutos vibradores. Las variaciones en la frecuencia de vibración deberían ayudar a que Aurora determinase cuánta fuerza debe aplicar el brazo robótico para, pongamos por caso, recoger una pieza de fruta y sostenerla mientras se la acerca a la boca. Este experimento proporcionará, quizá, la prueba más concreta hasta el momento de que una persona que padece una grave parálisis podría recuperar los movimientos básicos del brazo gracias a un implante en el cerebro que se comunicase, mediante hilos o por medios inalámbricos, con generadores de señal insertos en la extremidad.

Si las sensaciones visuales y táctiles consiguen remedar la información que fluye entre el cerebro y el brazo de Aurora, cabrá dentro de lo posible que la interacción prolongada con una ICM llegue a estimular al cerebro de forma que incorpore el brazo robótico a la representación mental del cuerpo —esquema que se sabe existe en la mayoría de las regiones cerebrales—. Con otras palabras: el cerebro de Aurora podría representarse el dispositivo artificial como si fuera una parte más de su cuerpo. El tejido nervioso del cerebro podría incluso dedicarse a manejar el brazo robótico y a interpretar la realimentación que proporcione.

Para verificar la solidez de esta hipótesis, proyectamos la ejecución de experimentos como los realizados con Aurora, con la salvedad de que se anestesiará temporalmente uno de los brazos del animal, suprimiendo con ello la realimentación natural. Pronosticamos que, al cabo de un período de transición, el primate será capaz de interactuar sin dificultad con la ICM. Si el cerebro llega realmente a integrar el brazo robótico en sus representaciones somáticas, es razonable suponer que otro tanto haría el cerebro de un parapléjico: reasignaría neuronas, que en un tiempo sirvieron a un miembro natural, al control y gobierno de uno artificial.

Cada progreso pone de manifiesto cuán plástico es el cerebro. Pero ha de haber límites. Es improbable, por ejemplo, que la víctima de un accidente cerebrovascular consiga el control completo de un miembro robótico. Las lesiones que causan suelen ser extensas e implican a tan gran porción de la materia blanca —las fibras que permiten la comunicación entre las regiones cerebrales—, que la destrucción supera la plasticidad del cerebro. Tal es el motivo de que las víctimas de accidentes cerebrovasculares que pierden el control de miembros no lesionados rara vez lleguen a recuperarlo.

Comprobación de realidad

A pesar de las buenas noticias, los investigadores hemos de ser muy prudentes y no ofrecer falsas esperanzas a quienes padecen discapacidades severas. Es necesario superar todavía muchos obstáculos antes de que se pueda considerar a las ICM opciones seguras, eficaces terapéuticamente. Hemos de demostrar con ensayos clínicos que ICM concretas ofrecerían un bienestar mayor sin plantear un riesgo de lesiones neurológicas adicionales.

La implantación quirúrgica de electrodos será siempre causa de preocupación médica. Habrá que evaluar si los haces densos de microhílos proporcionan registros viables y no causan a los pacientes lesiones tisulares o infecciones. El progreso hacia los haces densos ya se encuentra en marcha. Un técnico electrónico de Duke, Gary Lehew, ha diseñado formas de aumentar notablemente el número de microhílos montados en un haz ligero y fácil de implantar. Nos es posible ahora insertar múltiples haces, cada uno de los cuales lleva hasta 160 microhílos y mide 5 por 8 milímetros, menos que la uña del meñique. Hemos implantado recientemente 704 microhílos en ocho regiones corticales de un macaco; registramos 318 neuronas a la vez.

Por otra parte, tendrá que producirse una considerable miniaturización de la electrónica y de las baterías. Estamos ahora colaborando con José Carlos Príncipe, de la Universidad de Florida, a fin de crear microchips implantables que materializarán en dispositivos físicos el reconocimiento de pautas neuronales (tarea que hasta ahora se efectúa mediante programas); la interfaz cerebro-máquina podría librarse así del ordenador. Estos microchips enviarían datos por vía inalámbrica a los componentes robóticos. En colaboración con el laboratorio de Patrick D. Wolf, de la Universidad Duke, hemos construido el primer "neurochip" inalámbrico y probado una versión "beta" —la previa a la definitiva— con Aurora. Ver en un ordenador portátil, a muchos metros de distancia de Aurora, sus flujos de actividad neuronal —el primer radioenlace entre el cerebro de un primate y un ordenador—, fue una auténtica delicia.

Cada vez son más los científicos que abrazan la opinión de que las ICM ayudarían a los discapacitados. Varios laboratorios neurológicos tradicionales empe-

zaron a lo largo del pasado año a interesarse por los dispositivos neuroprotésicos. Han sido publicados hace poco los resultados preliminares de la Universidad estatal de Arizona, de la Universidad Brown y del Instituto de Tecnología de California. Algunos estudios proporcionan confirmación independiente de los que realizamos nosotros con ratas y monos. En la estatal de Arizona reprodujeron, en esencia, nuestro procedimiento tridimensional con los monos nocturnos y demostraron que vale también para los rhesus. Los científicos de la Brown lograron que un macaco rhesus desplazara un cursor por la pantalla de un ordenador. Ambos grupos registraron entre 10 y 20 neuronas por animal. Sus éxitos demuestran que esta nueva especialidad va progresando a buen ritmo.

Las interfaces cerebro-máquina más útiles sacarán partido de centenares o unos pocos millares de neuronas individuales distribuidas por múltiples regiones motoras de los lóbulos frontal y parietal. Las que sólo registren un pequeño número de neuronas (unas 30, pongamos por caso) de una única región cortical no proporcionarán servicio clínico alguno, porque carecen de la redundancia requerida para adaptarse a la pérdida de neuronas o a las variaciones en la respuesta neuronal. El otro extremo, el registro de millares de neuronas por medio de electrodos grandes, seguramente tampoco valdrá, por demasiado invasivo.

Es probable que los métodos no invasivos, aunque prometedores para ciertos fines, resulten de limitada aplicación cuando se trate de controlar prótesis mediante el pensamiento. La EEG (electroencefalografía), que efectúa registros en el cuero cabelludo, es una técnica no invasiva que podría servir para gobernar un tipo distinto de interfaz máquina-cerebro. Niels Birbaumer, de la Universidad de Tubinga, en Alemania, ha utilizado con éxito registros electroencefalográficos y una interfaz computarizada para enseñar a pacientes paralizados por dolencias neurológicas severas a modular su actividad EEG; se quiere que escojan de esa forma letras en la pantalla de un ordenador y escriban mensajes con ellas. El proceso es muy lento, pero ofrece la única manera de que estas personas se comuniquen con el mundo. Las prótesis de las extremidades, eso sí, no pueden utilizar directamente las señales EEG porque éstas representan la actividad eléctrica media de una amplia población de neuronas; es difícil extraer de ellas las variaciones finas necesarias para codificar el movimiento preciso del brazo y la mano.

A pesar de los obstáculos que subsisten, son muchas las razones para el optimismo. Quizá haya de transcurrir un decenio antes de que podamos presenciar el funcionamiento de la primera neuroprótesis humana; pero aquella tarde, en Durham, mientras veíamos en un monitor la actividad cerebral de Belle, pudimos soñar con las asombrosas posibilidades. Recordaremos siempre el sobrecogimiento que sentimos cuando contemplamos los procesos con los que un cerebro de primate genera un pensamiento. El de Belle mientras anhelaba una dosis de zumo, aunque sencillo, era un auténtico pensamiento, y obligó al mundo exterior a satisfacer ese deseo tan real.

Bibliografía complementaria

REAL-TIME CONTROL OF A ROBOT ARM USING SIMULTANEOUSLY RECORDED NEURONS IN THE MOTOR CORTEX. J. K. Chapin, K. A. Moxon, R. S. Markowitz y M.A.L. Nicolelis en *Nature Neurosciences*, vol. 2, páginas 664-670; julio de 1999.

REAL-TIME PREDICTION OF HAND TRAJECTORY BY ENSEMBLES OF CORTICAL NEURONS IN PRIMATES. J. Wessberg, C. R. Stambaugh, J. D. Kralik, P. D. Beck, J. K. Chapin, J. Kim, M. A. Srinivasan y M.A.L. Nicolelis, en *Nature*, vol. 408, páginas 361-365; 16 de noviembre de 2000.

ACTIONS FROM THOUGHTS. M. A. L. Nicolelis en *Nature*, vol. 409, páginas 403-497; 18 de enero de 2001.

ADVANCES IN NEURAL POPULATION CODING. Selección de M. A. L. Nicolelis. Progress in Brain Research, vol. 130, Elsevier, 2001.

NEURAL PROSTHESES FOR RESTORATION OF SENSORY AND MOTOR FUNCTION. Selección de J. K. Chapin y K. A. Moxon. CRC Press, 2001.

Vacíos espaciales

El espacio posee distintos grados de vacuidad, pero ni siquiera en la vasta inmensidad entre las galaxias existe un vacío absoluto

Evan Scannapieco, Patrick Petitjean y Tom Broadhurst

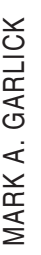
1. PARECEN GOTAS DE ROCIO SOBRE UNA TELARAÑA: las galaxias se reparten por los filamentos materiales que se extienden a lo largo de las vastas regiones del espacio intergaláctico. Gran parte de la historia del universo pudo haberse forjado en el toma y daca entre las galaxias y el gas intergaláctico. Esta representación gráfica se basa en las simulaciones por ordenador del gas cósmico.

Un viajero que sobrepasase los confines de la Vía Láctea se perdería en los lugares más vacíos que quepa imaginar. Tras la frontera del sistema solar se hallan las regiones interestelares de la galaxia. Tarda años la luz de las estrellas más cercanas en llegar hasta allí, y la densidad del gas apenas es de un átomo por centímetro cúbico. Pero hay partes más desiertas aún. A medida que el viajero se acercase a los límites del disco galáctico, las estrellas irían separándose decenas, cientos de años-luz; entre ellas el gas se enrarecería cien veces. Luego se internaría en la vasta inmensidad negra que se extiende más allá de la galaxia, donde el gas ni siquiera merece ese nombre: su densidad media es sólo de 10^{-5} átomos por centímetro cúbico.

Por lo que se refiere a la densidad, el contraste entre el espacio interplanetario y el intergaláctico es más violento que entre el agua y el aire. Podría esperarse que el punto final del viaje, los más remotos parajes del espacio, dejase muy corta la palabra "aburrido". Ni siquiera los astrónomos le dedicaban mucho tiempo al espacio intergaláctico. ¿Para qué estudiar una neblina atómica tan tenue cuando el universo está repleto de planetas, galaxias y agujeros negros?

Pero esa actitud ha cambiado. Lejos de ser un austero remanso, el medio intergaláctico aparece ahora en el centro de la evolución cósmica. Precede a las galaxias: en los primeros tiempos la materia adoptó la forma de un gas caliente y ubicuo. La expansión del universo enfrió el gas, que se condensó en los millares de galaxias que conocemos hoy día; los restos fueron haciéndose cada vez más difusos.

Hacía docenas de años que sabíamos esto. Sin embargo, pensábamos que el conocimiento detallado del gas intergaláctico carecía de importancia; en la formación de las galaxias sólo intervenía la gravedad. Conforme a esta manera de ver las cosas, el medio intergaláctico dejó de ofrecer resistencia a la gravedad, en cuanto abandonó el estado caliente e ionizado y se convirtió en una mezcla más fría de hidrógeno y helio neutros. Las regiones más densas arrastraron hacia sí la materia a expensas de las más vacías —proceso que continúa hoy día—. Las densidades, posiciones y tamaños de las galaxias y de las estructuras a gran escala dependían sólo de la distribución primordial aleatoria de la materia. Aun cuando el medio tuviese alguna complejidad interna, posibilidad que muchos reputaban improbable, no ejercería efecto alguno en las regiones del cosmos que de verdad contaban.


MARK A. GARLICK

No obstante, a medida que se descubrían las propiedades del gas, aumentaban las ocasiones de conflicto entre las observaciones y esta teoría tan simple. Se vio que el medio intergaláctico tiene una historia complicada, con varias etapas importantes íntimamente ligadas a la formación de las estructuras. Y se averiguó que el material más frágil se agrupa en una enorme red de hojas y filamentos gaseosos que tapiza como una tela de araña el espacio que media entre las galaxias.

Estas investigaciones fueron ganando ímpetu; en los dos últimos años han conocido un auge explosivo. No es fácil, sin embargo, estudiar algo que apenas puede ser visto. Para desvelar la historia del gas que fluye entre las galaxias, hay que reunir pruebas indirectas y combinarlas.

Un bosque de líneas espectrales

Estas pruebas proceden de cuatro tipos de observaciones: la radiación del fondo cósmico de microondas, los espectros de los cuásares, los rayos X de los cúmulos de galaxias y las mediciones del campo magnético. El fondo de microondas proporciona una instantánea del medio intergaláctico en el momento en que pasó de un estado ionizado al neutro, casi 300.000 años después de la gran explosión, cuando la temperatura del gas cayó a unos pocos miles de grados kelvin. Las estructuras de esta radiación definen el punto de partida de todos los modelos del medio intergaláctico.

Los cuásares, objetos muy brillantes encendidos por agujeros negros jóvenes y de gran masa, actúan como faros que iluminan estrechas extensiones del espacio intergaláctico. El material interpuesto entre nosotros y el cuásar absorbe la luz a ciertas longitudes de onda y deja una impronta en el espectro del cuásar. Para interpretar tales espectros se necesita cierto cuidado. Contienen líneas en longitudes de onda que no parecen corresponder a ninguna sustancia conocida. Este efecto deriva de la expansión del universo, que, al estirar las ondas de luz, desplaza las líneas espectrales desde sus posiciones normales hacia otras de mayor longitud de onda —proceso llamado corrimiento hacia el rojo—. Cuanto más lejos esté el emisor, más se habrá expandido el universo desde que la luz comenzara su viaje y, por tanto, mayor será el desplazamiento al rojo.

Resumen/*El medio intergaláctico*

- Conforme a una vara de medir terrestre, el espacio más cercano a la Tierra es casi un vacío; sin embargo, el espacio que media entre las galaxias es un millón de veces menos denso. Se dudaba en el pasado de que algo interesante pudiera ocurrir en un gas con tamaño enrarecimiento.
- Pese a ello, han ido acumulándose las observaciones que apuntan a que ese gas, o medio intergaláctico, ha sufrido al menos tres cambios profundos que han afectado a la formación de las galaxias y otras estructuras cósmicas.

El primer espectro de un cuásar se observó a mediados del decenio de 1960, pero sólo a finales de la década siguiente alcanzaron los detectores la sensibilidad suficiente para obtener espectros de alta calidad. Alec Boksenberg, entonces en el Colegio Universitario de Londres, y Wallace L. W. Sargent, del Instituto Tecnológico de California (Caltech), vieron que cada espectro contenía cientos de líneas en absorción. En una gráfica, recuerda a un manojo denso de líneas; de ahí el nombre que se dio a este fenómeno: el bosque de Lyman alfa. El término “Lyman alfa” indica que produce las líneas el gas de hidrógeno neutro. Que aparezcan en un gran número nos informa de que el espacio entre nosotros y el cuásar está repleto de cientos de nubes de gas, cada una a una distancia diferente y, por tanto, a un desplazamiento al rojo distinto (*véase el recuadro* “El bosque primigenio”).

Es curioso que el hidrógeno neutro explique la presencia de las líneas y, sin embargo, constituya sólo una parte muy pequeña de las nubes. El hidrógeno ionizado y el helio deben aportar el mayor contingente. El gas neutro absorbe la radiación a determinadas longitudes de onda; el movimiento térmico aleatorio de los átomos añade desplazamientos a los espectros, con el resultado de que las líneas, en teoría de grosor nulo, se ensanchan y crean bandas de anchura perceptible. En 1965, James E. Gunn y Bruce A. Peterson, entonces en el Caltech, demostraron que, si una fracción suficiente —poco más de una parte en un millón— del medio intergaláctico se hallaba en estado neutro, el ensanchamiento solaparía las líneas de nubes diferentes. En lugar de un bosque, se observaría una depresión continua.

Por tanto, la mera presencia del bosque de Lyman alfa es una prueba de que el medio intergaláctico neutro y frío, necesario para la formación de las galaxias por medio del puro colapso gravitatorio, debió de tener una vida más bien corta. Algo debió reionizar el gas antes de que se formaran la mayoría de los cuásares. Hace poco ha tenido lugar un descubrimiento relacionado con uno de los más viejos y lejanos que se conocen, el SDSSpJ103027.10+052455.0, descubierto por el Estudio Digital Sloan de los Cielos, el mayor esfuerzo realizado hasta la fecha por cartografiar el firmamento con detalle. El año pasado, Robert H. Becker, de la Universidad de California en Davis, y sus colaboradores encontraron una más ancha franja de absorción de la Lyman alfa en el espectro de este objeto; quizá se trate de la primera observación de la depresión que predijeron Gunn y Peterson. Podría ser un vislumbre del momento en que la reionización aún no había concluido.

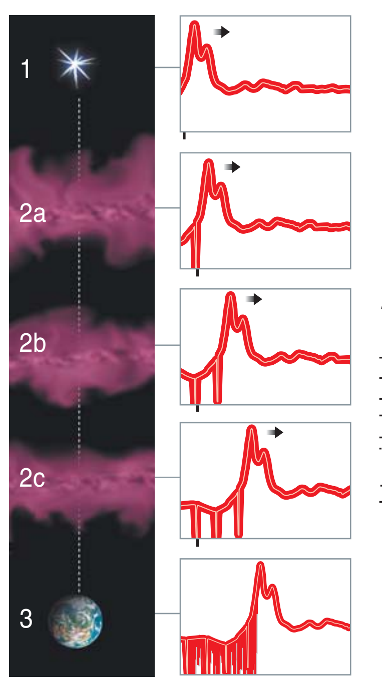
Los cuásares no sólo nos dan información sobre la densidad e ionización del medio intergaláctico, sino que además indican la distribución del material en el espacio. Cada espectro, con su “bosque”, viene a ser como la extracción de un testigo de hielo en los polos; el hielo sería en este caso el universo. Mediante la comparación de unos testigos con otros, y con la ayuda de simulaciones de la formación de estructuras por ordenador, se intenta reconstruir la distribución tridimensional de la materia. Las lentes gravitatorias,

EL BOSQUE PRIMIGENIO

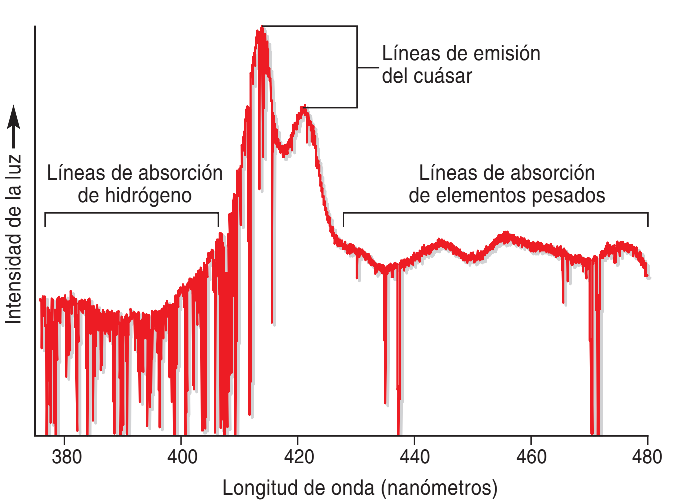
PESE A LO ENRARECIDO QUE ESTÁ, el gas intergaláctico delata su presencia al distorsionar la luz de otros objetos, en particular de los cuásares, los objetos más brillantes del universo conocido. Las nubes de gas actúan como un cristal tintado, que bloquea la luz de ciertas longitudes de onda y deja pasar el resto. Se engendra así una serie de líneas de absorción (depresiones afiladas) en los espectros de los cuásares. Un espectro típico presenta múltiples líneas; por esa razón, los astrónomos las denominan metafóricamente "bosque de Lyman alfa".

1 La luz emprende su viaje con un espectro de contorno suave (*línea roja*). Presenta un máximo a los 122 nanómetros, correspondiente a la llamada línea Lyman alfa.

2 A medida que la luz se propaga hacia la Tierra, hay dos efectos que modifican el espectro: la expansión cósmica lo desplaza hacia mayores longitudes de onda, uno; en virtud del otro, cada nube de hidrógeno que atraviesa la luz absorbe un poco del espectro (va creando depresiones afiladas). Cada absorción produce una nueva línea a los 122 nanómetros, que luego se desplaza con el resto del espectro.



3 Cuando la luz llega a la Tierra, el espectro está muy mellado, con cientos de líneas de hidrógeno e, incluso, con alguna que otra línea de elementos pesados. En este espectro del cuásar HE 1122-1628, el pico original está desplazado de los 122 a los 414 nanómetros; de ahí puede deducirse la distancia del cuásar.



DON DIXON (*ilustración*); ALICIA CALLE (*gráficas de la izquierda*); LAURIE GRACE (*gráfica de la derecha*)

o curvatura que la gravedad de los cuerpos imparte a la luz del cuásar, también valen para ese fin. Ese doblarse de la luz produce pares de testigos más próximos entre sí de lo que el azar permitiría. Basándose en ello, Michael Rauch, de los Observatorios Carnegie en Pasadena, Sargent y Thomas A. Barlow, del Caltech, midieron los movimientos del gas en el medio intergaláctico. Encontraron que, aunque la mayor parte del medio se halla en reposo, hubo sucesos de gran energía que agitaron las zonas más densas cada cien millones de años, más o menos.

En los últimos siete años, los estudios de las líneas de absorción han identificado no sólo hidrógeno neutro, sino también elementos pesados. El carbono ionizado, con su doblete característico —dos líneas de absorción en longitudes de onda muy próximas a la de la Lyman alfa—, fue el primer elemento en ser reconocido; siguieron otros, sobre todo el magnesio y el oxígeno. En las galaxias, los átomos de estas sustancias se agrupan con frecuencia en moléculas mayores —esto es, partículas de polvo— que enrojecen la luz que las atraviesa. No se observa tal enrojecimiento en las nubes que crean el bosque de Lyman alfa; quiere decir que en ellas los elementos pesados permanecen como átomos individuales, con una densidad de un átomo por cada millón de átomos de hidrógeno. Muy pequeña, pero basta para que quede claro que el medio intergaláctico no es un mero remanente de la formación de las galaxias. Los elementos sintetizados por las estrellas escaparon de las galaxias y llegaron al espacio que hay entre ellas.

Semillas magnéticas

Los espectros de los cuásares exploran nubes tenues y pequeñas muy alejadas de la Vía Láctea (por tanto, tal y como eran en momentos precoces de la historia cósmica). El tercer tipo de observación, en cambio, se refiere justo a lo contrario: a las grandes y densas bolsas de gas del universo cercano. Este gas reside en las mayores estructuras gravitatorias, los cúmulos gigantescos de galaxias. El nombre de "cúmulo de galaxias" es inadecuado; estos objetos consisten en un plasma caliente donde las galaxias se hallan dispersas como las pepitas en una sandía. El gas ionizado —no es más que una forma comprimida del medio intergaláctico— está calentado a varios millones de kelvin y brilla con intensidad en rayos X. El Observatorio Chandra y la Misión Multiespejo de Rayos X han facilitado notablemente nuestra investigación sobre dicho gas.

Según la teoría al uso de la formación de las estructuras cósmicas, el mero colapso gravitatorio calentó el gas del cúmulo. En tal caso, la temperatura debería ser proporcional a la masa y densidad y, por tanto, a la luminosidad; en concreto, la luminosidad debería

CUATRO MANERAS DE VER LO INVISIBLE

EL GAS INTERGALÁCTICO es casi invisible. No podemos estudiarlo directamente; se reconstruye su historia por medio de cuatro clases principales de pistas indirectas.

1 LAS MEDICIONES DEL FONDO DE MICROONDAS descubren el medio intergaláctico tal cual era hacia los inicios de la historia cósmica, denso y uniforme.

2 LOS ESPECTROS DE CUASARES nos muestran las nubes de gas intergaláctico como eran en un período intermedio; el material se estaba agrupando en estructuras cósmicas.

3 LAS IMAGENES EN RAYOS X revelan el gas intergaláctico del pasado más reciente; en concreto, el que se ha almacenado en los inmensos cúmulos de galaxias.

4 LAS LECTURAS MAGNETICAS recogidas con los radiotelescopios indican que el gas intergaláctico está magnetizado, por razones no bien conocidas.

Los autores

EVAN SCANNAPIECO, PATRICK PETITJEAN y TOM BROADHURST combinan la teoría y las observaciones en el estudio del espacio intergaláctico. Scannapieco y Broadhurst realizaron los primeros análisis teóricos del efecto que los vientos galácticos ejercían en la formación de otras galaxias. Scannapieco y Petitjean trabajan juntos en la interpretación de los elementos pesados observados en los espectros de los cuásares. Scannapieco, que también se interesa por la cosmología, trabaja para la Fundación Nacional de la Ciencia de Estados Unidos en el Observatorio Astrofísico de Florencia y el Instituto de Astrofísica de París. Petitjean es vicedirector de este Instituto y uno de los miembros más destacados de la red de investigación europea del medio intergaláctico. Broadhurst, profesor visitante en la Universidad Hebrea de Jerusalén, ha descubierto algunas de las galaxias más lejanas conocidas.

ser proporcional al cuadrado de la temperatura. Sin embargo, las observaciones muestran que la luminosidad es proporcional a la temperatura elevada a la potencia 3,5. También aquí parece que alguna actividad inesperada tuvo lugar en el medio intergaláctico.

El cuarto y último tipo de observación empírica se refiere a una de las propiedades más inciertas y, sin embargo, quizá decisivas del medio intergaláctico: la estructura magnética. A medida que los electrones se mueven por las regiones magnetizadas, emiten luz en longitudes de onda de radio. Esta emisión está polarizada en la misma dirección que el campo magnético. Por desgracia para los observadores, la baja densidad del gas intergaláctico debilita muchísimo la señal. En 1989, Kwang-Tae Kim y Philipp P. Kronberg, entonces en la Universidad de Toronto, y sus colaboradores encontraron un puente difuso de material magnetizado que conectaba dos cúmulos de galaxias, pero estas mediciones no se han extendido a regiones más profundas del espacio. Casi siempre, los astrónomos se han basado en los indicios obtenidos del estudio de las galaxias grandes y de los cúmulos. La mayoría de las galaxias espirales muestran intensos campos magnéticos, que podrían haber influido en su formación y rotación. La ordenada estructura de estas galaxias da a entender que un campo magnético “semilla” las precedió y fue intensificándose a medida que se iban configurando. A mayores escalas, los estudios en longitudes de onda de radio han hallado gas magnetizado difuso en varios cúmulos de galaxias cercanos. Se infiere que el medio intergaláctico, como un todo, está magnetizado.

El salto de Lyman

A pesar de que aún no se ha sacado de estas cuatro fuentes de información todo el jugo que podrían dar, sabemos ya gracias a ellas que el medio intergaláctico ha sufrido al menos tres cambios drásticos en el curso de la historia cósmica. La primera transición, del estado ionizado a neutro, es la que mejor conocemos. A esta “recombinación” se debió la emisión de la radiación del fondo de microondas.

La segunda transición, de neutro a ionizado, resulta más confusa. Pudieron originarla los cuásares, las estrellas de las jóvenes galaxias o incluso una población de estrellas de gran masa, que hasta ahora no se ha observado, distribuidas uniformemente por el espacio [*véase* “Estrellas primigenias”, por Richard B. Larson y Volker Bromm; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero 2002]. Aunque este fenómeno parece haber ejercido un efecto pequeño en la formación de las grandes galaxias, quizá generase una presión térmica que bastó para impedir la aparición de galaxias pequeñas; de esa manera habría complicado el sencillo cuadro que atribuye la creación de las estructuras al puro colapso gravitatorio.

Para determinar cuáles de las diversas posibles causas de la reionización actuaron en realidad, se ha estudiado cada una de ellas por separado. Los resultados no son definitivos. Las mejores observaciones estelares proceden de las “galaxias con salto de Lyman”; esta denominación alude al corte brusco que se observa en los espectros de esas galaxias, debido a que el hidrógeno neutro que contienen absorbe la luz de las estrellas. Las galaxias suficientemente lejanas presentan el salto desplazado desde su posición habitual —en el ultravioleta— hasta la zona óptica del espectro. Basta con encontrar ese salto en la luz visible para identificar una galaxia lejana como tal; así no hay que recurrir al tedioso análisis del corrimiento hacia el rojo línea a línea. Gracias a esta técnica, desarrollada en un principio por Charles C. Steidel, del Caltech, y sus colaboradores, se han confeccionado nutridos catálogos de galaxias lejanas; su luz estelar habría podido reionizar el gas intergaláctico. La pena es que este procedimiento adolece de un efecto de selección: tiende a escoger sólo las galaxias más brillantes. Por tanto, no capta la contribución estelar a la reionización en toda su magnitud.

Otro método examina la abundancia y distribución de los elementos pesados. Si estuviesen esparcidos por todas partes, significaría que los primeros objetos fueron probablemente estrellas de gran masa distribuidas de un modo homogéneo por el espacio. Los cuásares o las galaxias enanas habrían dispersado los elementos de manera más irregular. Por ahora, sin embargo, las medidas son demasiado imprecisas para servir de mucho. Lo máximo que cabe hacer es asignar límites a la distribución espacial del gas. Para ello, se combinan los espectros de los cuásares con las simulaciones numéricas de la formación de estructuras. El ajuste de los parámetros en la simulación hasta que se reproducen los espectros observados facilita una visión más clara de la red cósmica.

Material expulsado

De la tercera transformación del medio intergaláctico, la que explica la relación observada entre la luminosidad y la temperatura de los cúmulos de galaxias, se sabe aún menos. Nicholas Kaiser formuló en 1991 —estaba por entonces en Toronto— la teoría más convincente. Conjeturó que el gas del cúmulo se precalentó a varios millones de kelvin mucho antes de

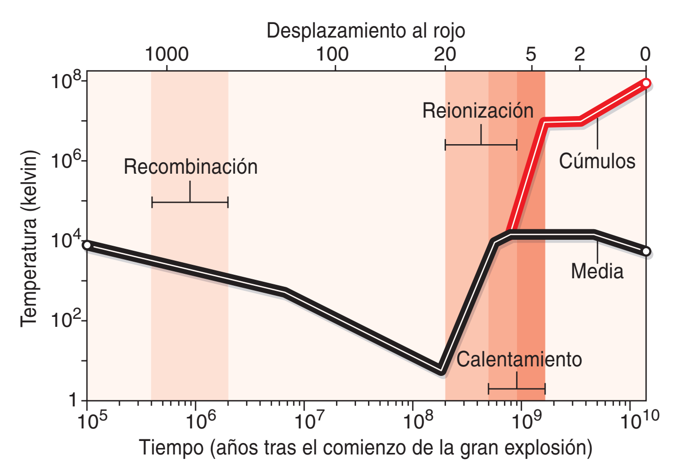
DON DIXON

que comenzara el colapso gravitatorio. Ese precalentamiento redujo la densidad del gas; el efecto fue mayor en los cúmulos menores, donde la gravedad es inferior. La disminución de la densidad condujo a luminosidades menores y acentuó la dependencia con la temperatura, relacionada con la masa del cúmulo.

El origen natural de ese precalentamiento se encontraría en las explosiones de las supernovas. Una sucesión rápida de supernovas habría expulsado materia más allá de las galaxias e inyectado no sólo energía, sino también elementos pesados en el medio intergaláctico. Los satélites de rayos X muestran que el gas de los cúmulos de galaxias está, sin duda, enriquecido con estos elementos. Más aún, el grado de enriquecimiento no difiere gran cosa, sin importar cuán jóvenes o viejos sean los cúmulos; parece, pues, que el enriquecimiento ocurrió en etapas muy tempranas de la vida de los cúmulos. Las supernovas lo explicarían: la primera oleada de estrellas nacidas en la galaxia habría explotado en tan sólo unos pocos millones de años.

La corroboración más clara de que las supernovas desempeñaron, en efecto, ese papel, proviene de las observaciones directas de remotas galaxias enanas con grandes brotes de nacimientos de estrellas; al carecer de una gravedad intensa, los estallidos debieron perturbarlas más. Max Pettini, de la Universidad de Cambridge, Steidel y Alice E. Shapley, del Caltech, con sus colaboradores, combinaron espectros de galaxias tomados tanto con luz óptica como en infrarrojos. Los espectros contienen en el visible dos conjuntos de líneas, el de la emisión del hidrógeno y el correspondiente a los elementos pesados que absorben la luz de los objetos del fondo. Los espectros infrarrojos contienen sólo un conjunto de líneas, emitidas por las nebulosas gaseosas del interior de las galaxias.

Pettini y su equipo observaron que estos tres conjuntos presentan corrimientos hacia el rojo diferentes:



2. LA HISTORIA TERMICA del medio intergaláctico presenta tres transiciones importantes. El medio ha afectado y se ha visto condicionado por la formación de las estructuras cósmicas, entre ellas los cúmulos de galaxias. Las observaciones revelan que ocurrieron a un desplazamiento al rojo particular, lo que se traduce (con cierta inseguridad) en lapsos concretos de tiempo.

SARA CHEN

los elementos pesados están menos desplazados que la galaxia; el hidrógeno, más. En otras palabras: con respecto al centro de la galaxia, los elementos pesados se mueven hacia nosotros a unos 300 kilómetros por segundo, mientras que el hidrógeno se aleja de nosotros a la misma velocidad.

Es una pauta extraña e inesperada. Según la interpretación más convincente, hay un torrente de material que fluye hacia el exterior de la galaxia, un viento cósmico que sopla hacia el espacio extragaláctico. Ese torrente contendría hidrógeno y elementos pesados; si bien en ciertas regiones cuesta menos detectar los elementos pesados y en otras el hidrógeno. Para que los elementos pesados sean visibles, deben encontrarse entre nosotros y el grueso de la galaxia; de otra forma no tendrían luz que absorber. Por tanto, han de estar alejándose del centro de la galaxia. Para el hidrógeno vale el razonamiento contrario: para que sea visible, también debe estar alejándose del centro, pero por el otro lado de la galaxia. Así, la luz que emite se desplaza al rojo con respecto a la longitud de onda que la materia interpuesta podría bloquear (*véase el recuadro* “La forma del viento”).

Se ha observado esta pauta en todas las galaxias enanas lejanas donde cabría detectarla. Los torrentes de materia debieron de ser comunes en el universo. Se han visto también gigantescas emisiones de material en galaxias cercanas. Un caso particularmente interesante es el de la galaxia enana NGC 1569, observada hace poco por Crystal Martin, de la Universidad de California en Santa Bárbara, y sus compañeros. A tenor de sus hallazgos, habría cantidades enormes de oxígeno y otros elementos pesados que escapan de la galaxia en forma de burbujas de un gas que se halla a temperaturas de millones de grados.

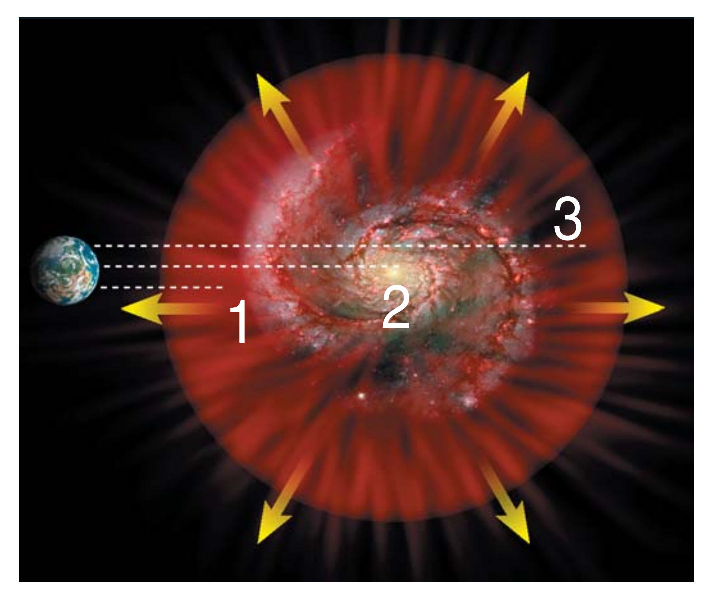
Los vientos agitaron las zonas más densas del medio intergaláctico; magnetizaron así vastas regiones del espacio y puede que incluso suprimiesen la formación de galaxias pequeñas. La transformación causada por las emisiones de materia tuvo mucho más calado que la debida a la reionización. Esta impidió la formación de galaxias de menos de unos pocos cientos de millones de masas solares; aquélla quizás haya acabado con galaxias diez veces mayores. Así se podría explicar uno de los enigmas más desconcertantes de la cosmología: las simulaciones de la formación de estructuras predicen muchas más galaxias pequeñas de las que se observan hoy día [*véase* “El ciclo vital de las galaxias”, por Guinevere Kauffmann y Frank van den Bosch; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto 2002].

Autorregulación

Por tanto, cada generación de objetos altera el medio intergaláctico, que, a su vez, determina las propiedades de la próxima generación. Las fuentes que reionizaron el universo generaron suficiente presión térmica como para regular su propia formación; los vientos de las galaxias donde abundan los estallidos de estrellas debieron de desmembrar otras galaxias incipientes. Se observan procesos de retroalimentación similares dentro de las propias galaxias, donde las su-

LA FORMA DEL VIENTO

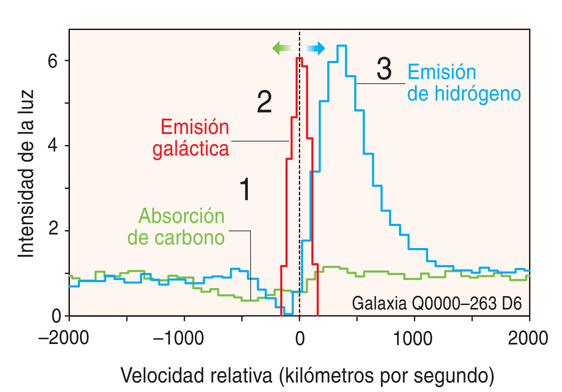
LA PRUEBA MÁS CONTUNDENTE de que las galaxias expulsan material al espacio intergaláctico reside en sus espectros. El viento aparece como un trío particular de líneas espectrales, que representan la parte frontal (*1*), central (*2*) y trasera (*3*) de la galaxia. Dos son picos; corresponden a una emisión. El otro es una depresión; indica absorción.



1 Mientras la luz viaja hacia la Tierra, atraviesa elementos pesados, por ejemplo el carbono, que absorben ciertas longitudes de onda. Este material se mueve hacia nosotros y desplaza la absorción hacia velocidades negativas con respecto a la galaxia.

2 Las nebulosas de la galaxia emiten luz infrarroja que sirve como punto de referencia.

3 El hidrógeno que fluye al otro lado de la galaxia emite luz. Como se aleja de nosotros, la emisión se desplaza hacia velocidades positivas. Gracias a este desplazamiento, la emisión atraviesa las galaxias sin ser absorbida.



pernovas y la luz ultravioleta de las estrellas actúan sobre el gas interestelar del que nace la siguiente generación de estrellas [*véase* “El gas entre las estrellas”, por Ronald J. Reynolds; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo 2002]. La idea de retroalimentación se está convirtiendo en un factor unificador en astronomía. Diríase que interviene a cualquier escala.

Nuevos resultados y métodos complementan sin cesar los cuatro tipos principales de observaciones. Las observaciones de la radiación del fondo de microondas, por ejemplo, cuentan ahora con sensibilidad suficiente para detectar las pequeñas perturbaciones debidas al material del medio intergaláctico. Las inhomogeneidades presentes durante la etapa de reionización dispersaron parte de los fotones de las microondas. Las regiones calientes del medio intergaláctico, entre ellas los cúmulos de galaxias, distorsionarían aún más la radiación. Este último fenómeno, o efecto Sunyaev-Zeldovich, se ha estudiado en cúmulos individuales; parece que un instrumento, el Creador de Imágenes del Fondo Cósmico, captó este verano sus efectos a gran escala.

Debemos a los grupos de Kenneth R. Sembach, del Instituto Científico del Telescopio Espacial, Blair Savage y Bart Wakker, de la Universidad de Wisconsin-Madison, una ingeniosa variante del análisis de las líneas de absorción de los cuásares. Han tomado datos con un satélite, el Explorador Espectroscópico en el Ultravioleta Lejano, a fin de estudiar el medio intergaláctico en las proximidades de la Vía Láctea. Sus mediciones han descubierto que las nubes de gas cercanas se distribuyen de forma irregular, reminiscencia de la red cósmica existente entre los cúmulos de galaxias; sin embargo, se desplazan a través de un medio que se encuentra, como el gas de los cúmulos, a millones de grados. Puede, pues, que circunde al Grupo Local de galaxias una corona extensa de gas, cuyas propiedades recordarían tanto a las regiones más densas como a las más difusas del medio intergaláctico. Regiones calientes como ésa podrían constituir un componente desconocido hasta ahora del medio intergaláctico; abarcarían buena parte de su masa total.

Estos y otros nuevos estudios ponen de manifiesto que la historia del medio intergaláctico sólo ahora empieza a ser contada, que aún nos esperan sorpresas. Todavía hemos de hacernos a la inesperada y compleja belleza de la red cósmica que cubre los lugares más desiertos del cosmos.

DON DIXON (*ilustración*); SARA CHEN (*gráfica*)

Bibliografía complementaria

THE LYMAN-ALPHA FOREST AT LOW-REDSHIFT: TRACING THE DARK MATTER FILAMENTS. Patrick Petitjean, Jan P. Mücket y Ronald E. Kates en *Astronomy & Astrophysics*, vol. 295, n.º 1, págs. L9-L12; marzo de 1995.

THE INTERGALACTIC MEDIUM. Piero Madau en *Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics*. Dirigido por Paul Murdin. Institute of Physics Publishing, 2001.

THE ROLE OF HEATING AND ENRICHMENT IN GALAXY FORMATION. Evan Scannapieco y Tom Broadhurst en *Astrophysical Journal*, vol. 659, n.º 1, págs. 28-45; marzo de 2001.

Tiburones de agua dulce,



ALAIN BENETEAU

actuales y fósiles

Los antepasados de los tiburones colonizaron las marismas y los ríos hace más de 350 millones de años. Adaptados al agua de mar o a las aguas dulces, según las restricciones del entorno, reflejan un éxito evolutivo sin parangón

Gilles Cuny



1. ESTOS XENACANTOS, *Orthacanthus* (*a la izquierda*) y *Triodus* (*arriba*), vivían hace unos 280 millones de años en agua dulce. Su capacidad de adaptarse a las aguas continentales les habría permitido librarse de la gran extinción que, hace unos 250 millones de años, señaló el final del Pérmico y el comienzo del Triásico.

¿Tiburones de agua dulce? Sí. Los tiburones y las rayas, sus primas cercanas, se hallan también presentes en las aguas continentales. Una cincuentena de especies de estos elasmobranquios —así se llama el grupo por ellos conformado— viven en los lagos, en los ríos y en los estuarios. Una cuantía que representa el cinco por ciento del número total de especies conocidas.

El tiburón *Carcharhinus leucas* es el ejemplo más famoso. Lo encontramos lo mismo cerca de las costas que bordean los mares tropicales, que en el lago Nicaragua (América Central), en el río Amazonas (América del Sur), en el Mississippi (América del Norte), el Zambeze (Africa) o en el río Brisbane (Australia). No es sorprendente que con esta amplia distribución haya recibido diversos nombres vulgares: tiburón bulldog, toro, ballenato, del Zambeze, del lago Nicaragua, de van Rooyen, escurridizo gris, etc.

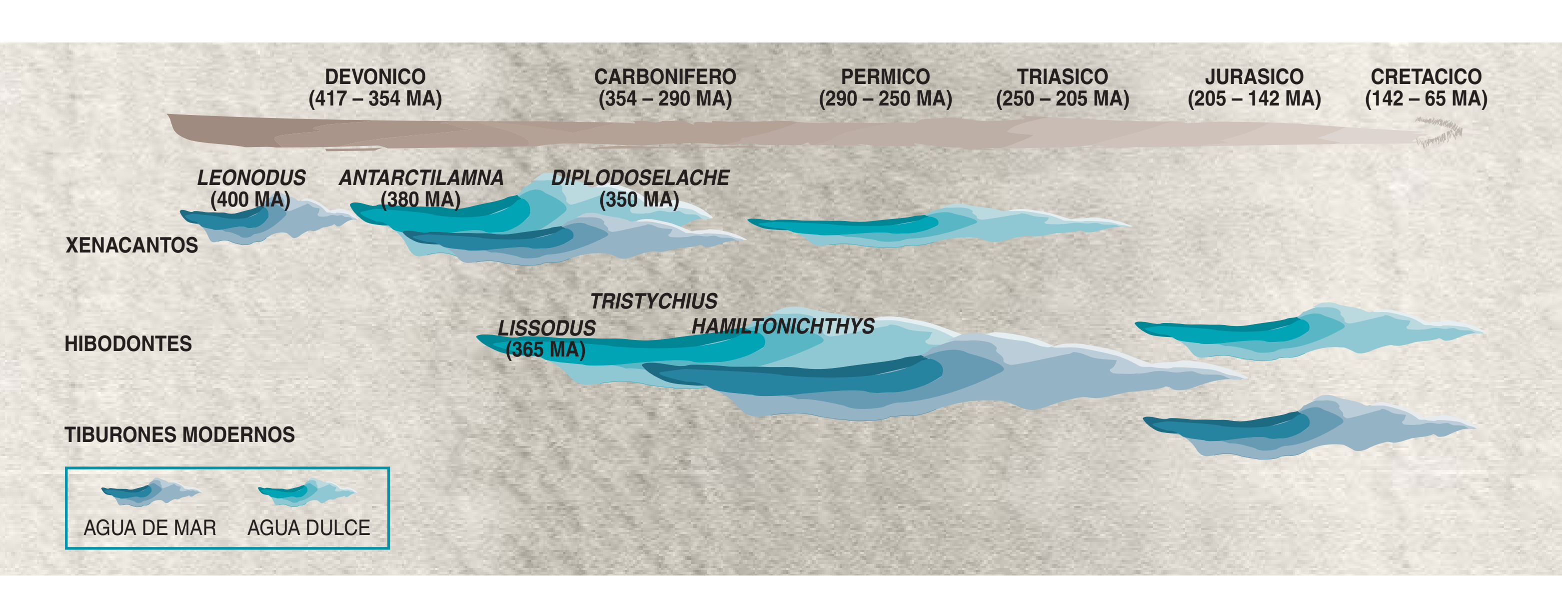
Los tiburones y las rayas que se aventuran en las aguas dulces, o que viven allí en permanencia, han adquirido especificidades fisiológicas que les permiten pasar de un medio rico en sal a otro sin sal, y de un medio rico en oxígeno, pues el agua de mar está prácticamente siempre sujeta a movimiento, a un medio más o menos carente de oxígeno. Por añadidura, estos elasmobranquios presentan otra característica sorprendente: durante 300 millones de años sus antepasados han evolucionado, se han adaptado ora a las aguas salinas, ora a las dulces, o bien a las dos, lo que quizá les ha evitado desaparecer con las grandes extinciones en masa, en particular la que se produjo hace 250 millones de años. Ostentan un récord casi absoluto de longevidad y de diversidad en el seno de los vertebrados.

El tiburón del lago Nicaragua

Carcharhinus leucas, común en las aguas marinas, suele realizar frecuentes incursiones en aguas continentales. Se le ha encontrado en el río Amazonas, a 4000 kilómetros de la desembocadura, y Mississippi arriba, tras remontar 2800 kilómetros. Alcanza 3,50 metros de longitud, tamaño que lo hace potencialmente peligroso para el hombre. Además, forma parte del puñado de especies responsables de muertes de personas, aunque se suele tender a atribuir este tipo de ataques al gran tiburón blanco o jaquetón (*Carcharodon carcharias*) o al tiburón tigre (*Galeocerdo cuvieri*). Así, en 1916, cuatro personas murieron y una resultó herida por un ataque de tiburones en Matawan Creek, en Nueva Jersey, en la costa oriental de los Estados Unidos. De tales agresiones se culpó, en un principio, a cierto tiburón blanco que merodeaba por la zona, atribución que daría origen a la película *Tiburón* unos decenios más tarde. En cualquier caso, uno de los ataques tuvo lugar a 18 kilómetros de la costa, y los tiburones blancos no se aventuran en agua dulce. Además, es muy improbable que un mismo ejemplar fuera el responsable de todos esos ataques. La mayoría de los especialistas están hoy día de acuerdo en que se trataría de varios tiburones bulldog.

El tiburón escurridizo gris no es el único de agua dulce. El tiburón de la especie *Glyphis gangeticus* vive en el Ganges. Sin embargo, trátese de una u otra especie, los tiburones de agua dulce son raros: el 95 por ciento de las especies se concentran en el medio marino.

No podemos predicar lo mismo de las rayas, frecuentes en el medio fluvial. Una familia entera, la de los Potamotrigónidos, se ha instalado en las aguas



2. LOS XENACANTOS DEL DEVONICO INFERIOR vivieron primero en el mar. Después, en el Devónico superior, colonizaron las aguas continentales, en cuyo seno proliferaron. En el Pérmico, los Xenacantos habían desaparecido de los ambientes marinos. Simultáneamente, los Hibodontes colonizaron tanto las aguas dulces como las marinas. Después de la gran extinción de la frontera permotriásica, se refugiaron en las aguas continentales, lo que les permitió sobrevivir durante 185 millones de años a la crisis. Los tiburones modernos (Neoselacios) aparecieron hace unos 240 millones de años.

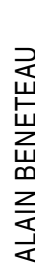
3. TIBURON BULLDOG O BALLENATO, *Carcharhinus leucas*, actual. Vive en el lago Nicaragua (América Central), en el río Amazonas (América del Sur), en el Mississippi (América del Norte), en el río Zambeze (Africa) y en el río Brisbane (Australia).

dulces. Ninguna de las 14 especies de estas pequeñas rayas de aproximadamente 30 centímetros de diámetro podría vivir en agua de mar. Son endémicas de América del Sur; en concreto, del este del continente. Medran sólo en las redes hidrográficas que vierten al Atlántico.

Hay familias típicamente marinas, como los Dasiátidos, taxón donde se incluye la pastinaca o chucho (*Dasyatis pastinaca*), frecuentes en las costas atlánticas y mediterráneas, que tienen asimismo representantes de agua dulce. En Tailandia, tres especies de dasiátidos viven de modo exclusivo en agua dulce: *Dasyatis laoensis* en el Mekong, *Himantura signifer* en el Chaofraya e *Himantura chaophraya* en ambos ríos. Mientras que las dos primeras son rayas irrelevantes, que no sobrepasan los 30 centímetros de diámetro como máximo, *Himantura chaophraya* es una raya imponente, que a veces alcanza los dos metros de diámetro. Su cola, en forma de látigo y armada con una espina aserrada venenosa, duplica la longitud del disco; por eso, la longitud total del animal mide en ocasiones hasta seis metros, lo que la convierte en la raya gigante de las aguas continentales. Además de estas formas fluviales, otros dasiátidos de Tailandia (*Himantura bleekeri, Himantura fluviorum* y *Pastinachus sephen*) medran en los estuarios, aunque no se trate, en propiedad, de especies de agua dulce. *Himantura fluviorum* es objeto de una pesca intensiva.

Pristis perotteti, un pez sierra de América Central y del Sur, pasa de los lagos al océano, y al revés. Ha establecido poblaciones genéticamente diferenciadas en algunos lagos.

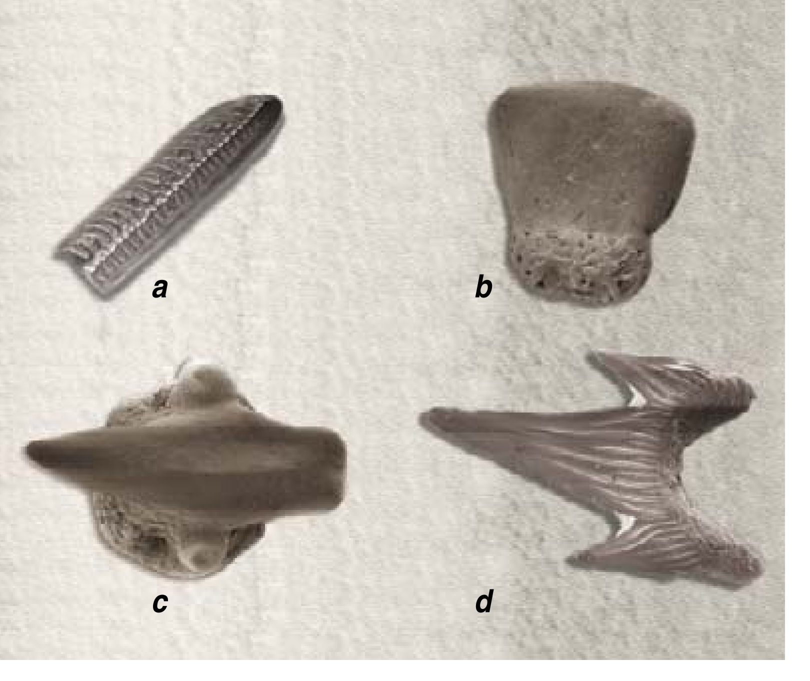
Observamos, pues, que algunas especies de rayas son exclusivas del mar, otras de las aguas continentales y otras, por fin, que se adaptan a ambos medios. Para conseguirlo, su fisiología debe acomodarse a las notables variaciones de la concentración de sales en el agua y sobrevivir en ambientes pobres en oxígeno.



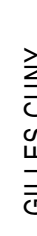
¿Qué características han permitido estas adaptaciones? Desde el punto de vista fisiológico, el paso del agua salada al agua dulce plantea una dificultad fisicoquímica: la variación de la presión osmótica. Cuando dos soluciones acuosas se ponen en contacto separadas por una membrana (en este caso la piel), los iones disueltos se difunden: sus concentraciones tienden a equilibrarse a uno y otro lado de la membrana. Así, en el agua de mar, la sal tiende a acumularse en los organismos, mientras que desde su interior difunden agua hacia el exterior. Los dos factores aumentan la concentración iónica (y la presión osmótica) en el animal.

¿Cómo pueden los organismos marinos equilibrar las presiones osmóticas y, en consecuencia, evitar una entrada de sales y reducir la salida de agua? Para conseguirlo, los tiburones marinos poseen una elevada concentración de urea en sangre; la urea, una sustancia que no se difunde, ejerce a su vez una presión osmótica, que se opone a la de la sal del agua de mar, con lo que se evita la entrada de sal y la salida de agua corporal.

Cuando el animal pasa al agua dulce, el problema se invierte: el medio corporal del tiburón se encuentra ahora con una concentración salina superior a la del medio exterior. Para evitar una entrada de agua exte-



4. DIENTES DE TIBURONES FOSILES: diente de hibodonte de Tailandia (*a, un centímetro*) y de *Tribodus* de Tunicia (*b, dos milímetros*), que asimismo es un hibodonte. Dientes de neoselacios: *Onchopristis* (*c, dos milímetros*) y *Cretodus* (*d, cinco milímetros*), ambos de Tunicia.



rior y una salida de sales, el tiburón bulldog que se aventura en agua dulce "ajusta" sus concentraciones sanguíneas: la concentración en sal disminuye en un 20 por ciento y la de urea en un 50 por ciento, de manera que la presión osmótica se reduce a la mitad. No obstante, esta reducción es insuficiente para evitar que el agua se acumule en el tiburón, que evita los edemas al multiplicar por 20 su producción de orina; de ese modo evacua el excedente de agua.

Los tiburones deben, pues, evitar, por un lado, la entrada de agua y, por otro, las pérdidas de sales: la concentración de sal en la orina se reduce asimismo en un factor de 20. Una glándula rectal, que en agua de mar excreta el exceso de cloruro de sodio al medio, cesa de funcionar en agua dulce. Todos estos ajustes pueden invertirse de inmediato, en cuanto el animal retorna al mar. Sólo las rayas de la familia Potamotrigónidos se han adaptado completamente a la vida en agua dulce, con la pérdida consiguiente de la capacidad de concentrar la urea en sangre. Al haber prescindido de la glándula rectal funcional, su retorno al medio marino se ha vuelto fisiológicamente imposible.

Existen, pues, elasmobranquios de agua dulce. Con todo, lo esencial de la biomasa actual de tiburones y rayas está restringido a las aguas marinas. A lo largo de su evolución, estas especies han adquirido mecanismos de adaptación a ambos ambientes (agua salada y agua dulce). El estudio de sus antepasados ha revelado la antigüedad de tal capacidad de adaptarse a salinidades diversas, que constituye, además, un factor importante de su evolución.

Los Elasmobranquios se dividen en cuatro grupos: Xenacantos, Ctenacantos, Hibodontes y Neoselacios, o tiburones modernos. Los tres primeros grupos aparecen en el registro fósil desde el Devónico (hace de 417 a 354 millones de años), pero hay que esperar al Triásico inferior (hace unos 250 millones de años) para observar a los primeros neoselacios. No abordaremos los Ctenacantos, un grupo relativamente mal conocido y raro en los ambientes no marinos. En cambio, Xenacantos e Hibodontes sí proliferaron en aguas continentales.

Los Xenacantos: 200 millones de años de existencia

Los xenacantos fósiles más antiguos se han identificado a partir de dientes aislados, recuperados del Devónico inferior (400 millones de años antes del presente) de España. Tales piezas, atribuidas al género *Leonodus*, se han encontrado en el medio marino. No parece que *Leonodus* manifestara ninguna afinidad por las aguas dulces. Por el contrario, los fósiles siguientes, identificados a partir de esqueletos más o menos completos, se descubrieron en ambientes de influencia continental. Se trata de *Antarctilamna* del Devónico medio (380 millones de años a. p.) y de *Diplodoselache* del Carbonífero inferior (350 millones de años a. p.).

Diplodoselache vivía en Escocia, en una gran laguna de agua dulce cercana a un estuario fluvial. Mucho más amplia se nos ofrece la distribución de *Antarctilamna*, con restos procedentes de Australia, la Antártida, América del Sur y Arabia Saudita. Tamaña distribución paleogeográfica indica que penetraba en el mar; o, cuando menos, que merodeaba a lo largo de las costas de Gondwana, extenso continente austral que agrupaba los continentes y países mencionados. Parece que estos xenacantos toleraban grados diversos de salinidad, sin que estuvieran adaptados a la vida en agua dulce.

Durante el Devónico y el Carbonífero inferior no suelen abundar en las faunas los tiburones xenacantos. Sin embargo, desde el Carbonífero superior (hace unos 290 millones de años) multiplican su presencia, al tiempo que evidencian una especialización neta para los ambientes dulceacuícolas. Sus fósiles se hallan a menudo asociados a yacimientos de lagos o ríos. Muestran una morfología adaptada a este modo de vida: su aleta dorsal se alarga hasta cubrir todo el dorso y se une por atrás a la aleta caudal, muy alargada; el conjunto confiere al animal el aspecto de una anguila, muy alejado de la imagen del tiburón típico. Las aletas pectorales desarrollan un eje mediano, un arquipterigio, que les otorga una gran movilidad. Los Dipnoos actuales (orden de peces de agua dulce que poseen branquias y pulmones) están provistos de una estructura similar. Por otra parte, estos peces poseen una silueta que recuerda a la de los Xenancantos: cuerpo alargado, aleta caudal que no termina en media luna y aletas pectorales muy móviles.

A diferencia de lo que ocurre con la mayoría de los tiburones modernos, la aleta caudal no constituye el principal órgano propulsor. Nadan por ondulación del cuerpo entero. Los Dipnoos actuales, representados por *Neoceratodus* en Australia, *Protopterus* en Africa y *Lepidosiren* en América del Sur, viven sobre

El autor

GILLES CUNY comparte su trabajo de conservador de las colecciones de paleontología de los vertebrados en el Museo Geológico de Copenhague con la docencia en la Universidad tailandesa de Maha Sarakham.

el fondo de estanques o de ríos poco profundos. La gran movilidad de sus aletas pectorales les permite a veces "caminar" sobre los fondos llenos de plantas. Los Xenacantos de épocas prehistóricas poseían, sin duda, un modo de vida bastante similar. Se desplazaban probablemente en el seno de extensas marismas, frecuentes bajo el clima tropical de entonces, y debían cazar al acecho, escondidos entre la jungla acuática. Sus aletas pectorales y su cuerpo fusiforme facilitaban su desplazamiento por entre la maraña vegetal de las marismas.

Ahora bien, estas inmensas extensiones de agua dulce estancada son en general pobres en oxígeno. Con el fin de compensar dicha falta de oxígeno, la mayoría de los otros habitantes de tales áreas pantanosas han adquirido un sistema de respiración aérea. Es el caso de los anfibios, de los peces crosopterigios (primos del celacanto), de los dipnoos y de los Paleoníscidos (peces óseos). Un pulmón rudimentario les permite extraer, del aire que respiran, el oxígeno necesario. Los Xenacantos, en cambio, no presentan traza alguna de una estructura que recuerde la presencia de un pulmón, ni siquiera rudimentario.

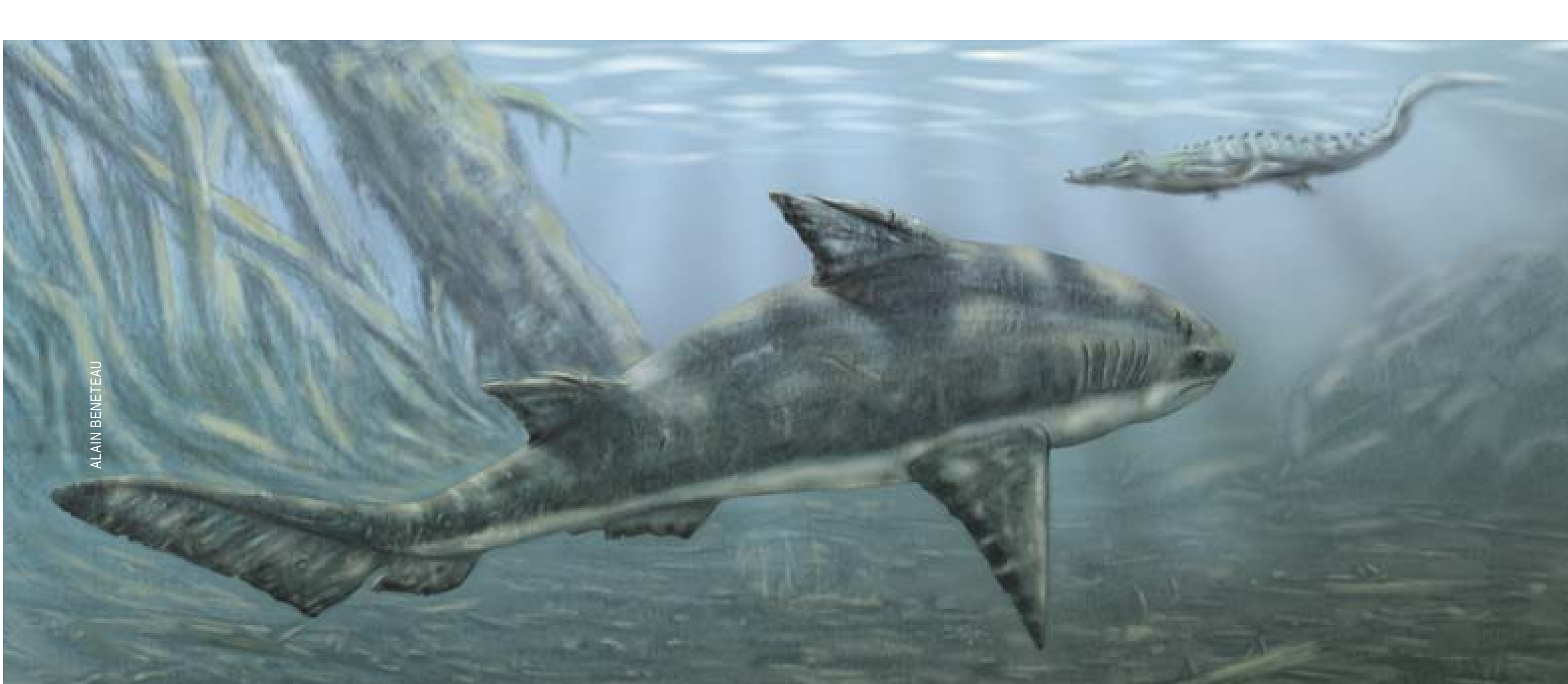
Quizá la demanda de oxígeno de estos animales era inferior a la media, si no disponían de un método de respiración aérea que ignoramos y que les habría permitido adaptarse a zonas *a priori* inhóspitas. Parecen haber compartido ese menor requerimiento de oxígeno con otro grupo de peces paleozoicos, los Acantodios; a menudo, se encuentran asociados los fósiles de estos dos grupos. Puesto que no podemos deducir la fisiología de un animal a partir únicamente de los restos fosilizados de su esqueleto, ignoramos hasta qué punto los Xenacantos estaban adaptados a la vida en agua dulce. ¿Habían perdido, como los Potamotrigónidos, la capacidad de concentrar urea en su sangre? ¿Era todavía funcional su glándula rectal? Son cuestiones que permanecerán, tal vez, abiertas para siempre.

Y los Xenacantos se libraron de la crisis

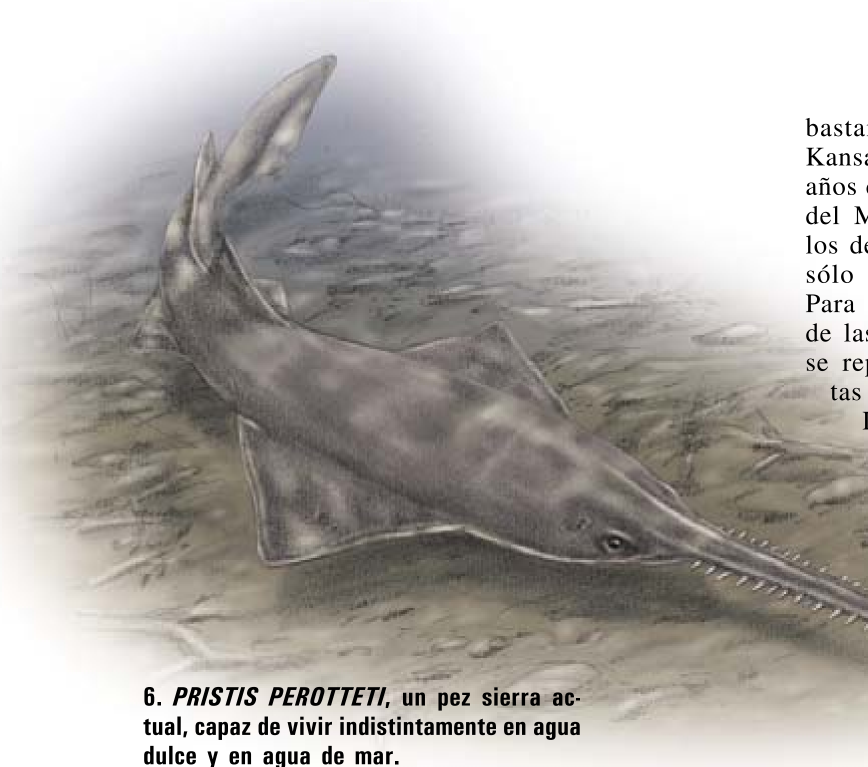
Los Xenacantos continuaron abundando hasta el final del Pérmico (hace unos 250 millones de años), cuando aconteció la crisis permotriásica, la más importante de las extinciones en masa que ha conocido nuestro planeta. Este cataclismo modificó profundamente la composición de las faunas de peces cartilaginosos. Numerosas formas típicas del Paleozoico, como los Petalodontos y los Eugeneodontiformes, desaparecieron. No así los Xenacantos, cuyos dientes fósiles se encuentran hasta los estratos geológicos correspondientes al Triásico superior (205 millones de años) de América del Norte y la India. Aunque menos diversificados que durante el Pérmico, los Xenacantos sobrevivieron durante más de 40 millones de años a la crisis permotriásica. Por último, otra extinción en masa acabó con ellos, al final del Triásico, tras una existencia que abarcó más de 200 millones de años.

¿Cómo sobrevivieron a la crisis permotriásica? Su hábitat específico en las aguas dulces y su gran resistencia ante una falta de oxígeno fueron, sin duda, factores determinantes. En un primer momento, sufrieron la crisis permotriásica sobre todo los ecosistemas costeros, pues al agregarse los continentes se redujeron los espacios costeros y los mares; en los medios marinos que quedaron, la competencia aumentó de manera notable y, simultáneamente, muchas especies desaparecieron. Por el contrario, la superficie de las redes hidrográficas continentales cambió poco, de manera que los ecosistemas acuáticos continentales se vieron menos alterados.

Más tarde, al final del Pérmico, subió el nivel de los mares. Extensas regiones quedaron inundadas por aguas estancadas pobres en oxígeno. Pero los Xe-



5. *HYBODUS*, un hibodonte típico del Cretácico.



6. *PRISTIS PEROTTETI*, un pez sierra actual, capaz de vivir indistintamente en agua dulce y en agua de mar.

nacantos se hallaban notablemente bien adaptados para enfrentarse a este tipo de situación. Además, parece que eran capaces de alimentarse prácticamente de todo lo que se movía a su alcance, incluidos sus propios congéneres. A pesar de todo, su resistencia fue relativa y las formas de gran tamaño se extinguieron, probablemente al verse privadas de un número suficiente de presas. Sólo las especies cuyos individuos no sobrepasaban un metro de longitud pervivían en las marismas del Triásico. Así pues, la capacidad de adaptarse a ambientes de agua dulce con poco oxígeno parece que dio a los Xenacantos una ventaja adicional de 40 millones de años con respecto a muchos de sus primos paleozoicos, que se extinguieron con la crisis permotriásica.

El éxito de los Hibodontes

Los Hibodontes representan el otro grupo de elasmobranquios fósiles cuya evolución vino condicionada por la adaptación a las aguas dulces. De los hibodontes más antiguos sólo nos han llegado dientes sueltos, recuperados del Devónico superior de Francia (hace unos 365 millones de años). Atribuidas al género *Lissodus*, las piezas dentarias en cuestión provienen de un ambiente marino y parecen confirmar un origen marino para los Hibodontes, al igual que ocurría con los Xenacantos. En el Carbonífero inferior, dos hibodontes, *Tristychius* y *Onychoselache*, comparten la misma laguna de agua dulce escocesa que *Diploselache*. Al igual que ocurría con éste, los Hibodontes parecen presentar, desde muy pronto en el curso de su historia, una tolerancia a las variaciones de salinidad.

En el Carbonífero superior, otro hibodonte, *Hamiltonichthys*, se hallaba adaptado a los ambientes de agua dulce, pues se han recogido seis ejemplares juveniles bastante completos en una cantera abandonada de Kansas, en un ambiente que hace 295 millones de años correspondía a un antiguo estuario. John Maisey, del Museo de Historia Natural de Nueva York, que los describió, se preguntó por qué en ese yacimiento sólo se encontraron juveniles de *Hamiltonichthys*. Para responder hemos de acudir al comportamiento de las rayas actuales de la especie *Dasyatis guttata*: se reproducen en agua dulce a lo largo de las costas atlánticas, entre el golfo de México y Brasil. Después de su nacimiento, las crías descienden hacia el estuario para desarrollarse en un agua más salada. Adultos, remontan el curso del río, hacia aguas más dulces. Cabe, pues, sospechar un ciclo de vida similar para *Hamiltonichthys*, cuyos restos no se han encontrado nunca en el medio marino; numerosos hibodontes mesozoicos, como *Egertonodus basanus*, del Cretácico inferior de Inglaterra, habrían desarrollado el mismo modo de vida.

Además de *Tristychius*, *Onychoselache* y *Hamiltonichthys*, conocidos a partir de restos casi completos, el registro fósil de los hibodontes paleozoicos se basa en dientes sueltos. Raramente dominan las faunas de esta era; se presentan como tiburones más bien discretos. La situación cambia en el Triásico, cuando se convierten en los tiburones dominantes y ofrecen una diversidad máxima. La crisis permotriásica apenas los perturbó, pues constituían entonces pequeños depredadores oportunistas, dispuestos a alimentarse de cualquier bocado, de carroña si preciso era. Por eso, podían adaptarse rápidamente a la modificación drástica de su ambiente. Añádase que, igual que los Xenacantos, los Hibodontes del Paleozoico podían vivir en agua dulce, medio que la crisis permotriásica respetó. Una vez más, la posibilidad de encontrar refugio en ambientes de agua dulce parece haber desempeñado un papel esencial en la supervivencia de este grupo en tiempos de crisis. Pasada la prueba, no tuvieron prácticamente competencia, porque los tiburones dominantes del Paleozoico habían desaparecido todos, con la excepción de algunos raros ctenacantos y xenacantos. Pudieron entonces ocupar una amplia variedad de nichos ecológicos.

Así pues, el éxito de los Hibodontes fue máximo en el Triásico, período en el que dominaron las faunas marinas. A partir del Jurásico (hace entre 205 y 142 millones de años) decae su número en los mares, declive que se explica por el desarrollo de la estirpe de los tiburones y rayas actuales, los Neoselacios.

Los Neoselacios suplantaron progresivamente a los Hibodontes, pues habían adquirido, gracias a una columna vertebral más rígida, una natación rápida y potente: fueron los primeros en dar alcance a las presas. Los Hibodontes buscaron refugio en las aguas dulces que ya habían colonizado desde hacía más de 200 millones de años. Durante el Cretácico, la mayoría de los hibodontes vivían en lagos y ríos; sólo las formas trituradoras de gran talla, como *Ptychodus* y *Asteracanthus*, que probablemente se alimentaban de

ALAIN BENETEAU

ammonites, despreciados por los Neoselacios, vivían en el medio marino.

En estratos correspondientes al Cretácico inferior de Tailandia se han descubierto seis géneros de hibodontes, en su mayoría nuevos, que habían invadido los lagos y ríos de aquella región. (Se están estudiando.) Revelan una notable adaptación a un ambiente de agua dulce. Algunos poseían dientes poco especializados y representaban oportunistas; otros, como *Heteroptychodus steinmanni*, poseían poderosos dientes planos, aptos para triturar las conchas de los grandes bivalvos de agua dulce, frecuentes en las rocas sedimentarias de aquella época, en Tailandia. *Thaiodus ruchae* desarrolló una dentadura muy especializada, de tipo cortador: se alimentaba de peces de tamaño excesivo para poderlos tragar de golpe. *Thaiodus* fue descrito por Henri Cappetta, de la Universidad de Montpellier, en 1990, a partir de dientes muy alargados, bajos y comprimidos. La parte superior de la corona presenta un reborde irregular que transforma los dientes en sierras.

Hibodontes de agua dulce

Por la misma época encontramos en Africa una dentadura de este tipo. Corresponde a otros dos hibodontes, *Pororhiza molimbaensis* y *Priohybodus arambourgi*. Ahora bien, todavía no se había descubierto ningún hibodonte provisto de una tal dentadura de tipo cortador, mientras que este tipo de dentadura es corriente en los Neoselacios. El desarrollo de un tipo dental nuevo confirma su éxito en las aguas dulces del Cretácico inferior. Las faunas de Tailandia son específicas del sudeste asiático. La mayoría de las seis especies tailandesas aparecen sólo en este país; *Thaiodus* se ha recuperado, asimismo, en el Tíbet; *Heteroptychodus*, en el Japón. Africa parece ser el otro continente donde medraron los hibodontes de agua dulce. No obstante, las formas tailandesas, *Pororhiza* y *Priohybodus*, se encontraban en ambientes en los que los Neoselacios, sus competidores directos, se hallaban ausentes. ¿Ha de deducirse de ello que el éxito de los Hibodontes se debió a la ausencia de su principal competidor?

No se trataría de un éxito por mera ausencia, si hemos de creer los descubrimientos hechos en Tunicia, en la Formación Chenini, del Albiense inferior (hace unos 110 millones de años). Allí se ha desenterrado una fauna continental constituida por dinosaurios, tortugas y cocodrilos, así como por peces del género *Lepidotes* y tiburones. Dicha fauna de tiburones está dominada por un hibodonte, *Tribodus*, cuya dentición trituradora muestra una notable convergencia con la de las rayas modernas: pequeños dientes hexagonales imbricados unos en otros y formando una amplia placa trituradora. Aquí, los neoselacios coinciden con el hibodonte. Están representados por un depredador temible, *Cretodus*, cuyo modo de vida recordaría el del tiburón bulldog actual, y por *Onchopristis*, un pez sierra perteneciente a la familia extinta de los Esclerorrínquidos. Estos desaparecieron al final del Cretácico, como los dinosaurios.

A lo largo de la evolución de los Elasmobranquios, ha aparecido tres veces, de manera independiente, un rostro dentado. Lo desarrollaron primero los Esclerorrínquidos, durante el Cretácico medio. Alrededor de 25 millones de años más tarde, en el Cretácico superior, llegan los primeros tiburones sierra, los Pristioforiformes. Por último, dicha sierra surgirá una tercera vez, en el Eoceno, en los Prístidos, que derivan de las rayas guitarra. Esta "herramienta" ha sido muy apreciada. Además, los Esclerorrínquidos, al igual que sus equivalentes actuales, los Prístidos, adquirieron muy pronto, tal parece, una gran tolerancia por las aguas dulces.

La presencia de neoselacios en las faunas de la Formación Chenini restringe la diversidad de los Hibodontes a una sola especie frente a seis en Tailandia, en la misma época, pero los dientes de *Tribodus* menudean mucho más en la Formación Chenini que los de *Cretodus* y *Onchopristis* juntos. Además, *Tribodus* no está acantonado sólo en Africa; se le conoce también en Brasil, donde fue descrito por Paolo Brito, de la Universidad de Río de Janeiro, en 1989. De hecho, los Hibodontes parecen haber conseguido un gran éxito gracias a un régimen durófago, es decir, que se alimentaban de organismos con concha. Pudieron siempre competir eficazmente con los Neoselacios, lo mismo en las aguas continentales (*Tribodus*) que en el mar (*Ptychodus*). Ello guarda una evidente relación con la estructura muy distinta del esmalte que recubre los dientes de ambos tipos de tiburones: los Neoselacios poseen un esmalte complejo, de tres capas, que les permite tener dientes especialmente eficaces para desgarrar a una presa, aunque no son demasiado resistentes a las fuerzas de compresión, a diferencia del esmalte monocapa de los Hibodontes. Por otra parte, las rayas, que son los neoselacios perfectamente adaptados a un régimen triturador, han perdido el esmalte de tres capas en beneficio de un esmalte muy parecido al de los Hibodontes.

No obstante, la competencia con los Neoselacios se hizo cada vez más dura a medida que se acercaba el final del Cretácico. Declinó el número de Hibodontes y el cataclismo que, hace 65 millones de años, puso fin a la existencia de los dinosaurios los barrió de la superficie del planeta. Después de unos 300 millones de años, dejaron el campo libre a los tiburones modernos. Pero ello no les resta mérito, pues los Hibodontes nunca fueron igualados en términos de éxito adaptativo y de longevidad, fortuna que debieron a su notable capacidad de colonizar tanto los lagos y ríos como los océanos.

Bibliografía complementaria

SHARKS AND RAYS OF AUSTRALIA. Peter Last y John Stevens. CSIRO; Australia, 1994.

THE RISE OF FISHES, 500 MILLION YEARS OF EVOLUTION. John Long. The Johns Hopkins University Press; Baltimore, 1995.

LES REQUINS SONT-ILS DES FOSSILES VIVANTS? Gilles Cuny, EDP Sciences; París, 2002.

Origen de la vida

Generación espontánea de aminoácidos en el espacio

Una de las preguntas básicas que más ha intrigado al ser humano desde que adquirió conciencia de serlo es "¿De dónde venimos?". En la actualidad, el origen de la vida sigue siendo un misterio, aunque ahora podamos interpretar y manipular el código genético casi a nuestro antojo. Sabemos que los organismos más simples pueden vivir en condiciones muy extremas. Según indican los hallazgos de microfósiles, las primeras formas de vida aparecieron hace al menos 3500 millones de años, poco después del masivo bombardeo de cometas que sufrió nuestro planeta.

Los aminoácidos son los componentes esenciales de la vida. En 1953, Stanley Miller obtuvo cuatro de estas moléculas simulando experimentalmente la atmósfera primitiva de la Tierra. Hoy se cree que dicha atmósfera presentaba una composición distinta, pobre en gases que contienen hidrógeno (metano y amoníaco). En tales condiciones es muy difícil conseguir aminoácidos. Por ello, algunos buscan el origen de la vida en las fuentes termales del fondo oceánico y no pocos han fijado sus ojos en el espacio.

En el Observatorio Astronómico de Leiden, en Holanda, simulamos experimentalmente las condiciones reinantes en el espacio interestelar, en concreto en las nebulosas densas donde se produce la formación de estrellas jóvenes. En dichas regiones, cuya temperatura apenas supera unos grados el cero absoluto, la materia existente está formada por gases y polvo interestelar.

Las partículas de polvo son menores que las del humo de un cigarrillo; no llegan a una micra. Dicho polvo está compuesto de silicatos (como minúsculos granitos de arena) cubiertos por una fina capa de hielo, que contiene principalmente agua, metanol, monóxido de carbono, dióxido de carbono y amoníaco. Pues bien, este hielo es irradiado por la luz ultravioleta que emiten las estrellas jóvenes más masivas. Fruto de esa irradiación, las moléculas se disocian formando radicales, que reaccionan dando lugar a moléculas orgánicas complejas.

La simulación se lleva a cabo en un sistema de vacío. (Aunque se les llama nebulosas densas, la densidad de materia en esas regiones es de sólo unos cuantos miles de átomos por centímetro cúbico, inferior, pues, al mejor vacío que puede conseguirse en el laboratorio.) Se deposita allí una fina capa de hielo en un bloque de aluminio a 12 K (–261 ºC), de composición similar a la descrita (esto es, H_2O:CH_3OH:CO:CO_2:NH_3 = 2:1:1:1:1), irradiando simultáneamente con una lámpara de luz ultravioleta. A continuación, se calienta el sistema hasta temperatura ambiente, con lo cual el hielo se sublima. El material que permanece contiene diversas moléculas orgánicas, entre las cuales detectamos 16 aminoácidos, seis de ellos presentes en proteínas, además de furanos y pirroles, ambas moléculas de interés biológico. Para determinar la composición química se utilizó un cromatógrafo de gases acoplado a un espectrómetro de masas. El análisis se llevó a cabo en el Centro de Biología Molecular de Orleans, en colaboración con Uwe Meierhenrich.

1. Guillermo M. Muñoz Caro junto al sistema de vacío en el cual se crearon 16 aminoácidos y otras moléculas prebióticas, en condiciones similares a las reinantes en nebulosas densas, las regiones de la galaxia donde nacen las estrellas

De nuestros resultados se deduce que pueden sintetizarse aminoácidos en los discos que rodean a las estrellas jóvenes, donde tiene lugar la formación de planetas; así, pues, estas moléculas se hallarían también disponibles en otros sistemas planetarios. ¿Cuál es su relación con el origen de la vida?

Los cometas nacieron de la aglomeración de las partículas de polvo que componen estos discos estelares. Eso implicaría que estos objetos también contienen aminoácidos. Por otra parte, se sabe que nuestro planeta sufrió un fuerte bombardeo de cometas cuando aún no existía la vida, hace unos 3900 millones de años. Los



2. Representación de un trozo de núcleo de un cometa, como un aglomerado de partículas de polvo interestelar. Estas últimas constan de un núcleo de silicatos cubierto por una capa de hielo y moléculas orgánicas. El material orgánico, reproducido en el laboratorio de Leiden, es producto de la irradiación del hielo con luz ultravioleta proveniente de estrellas masivas jóvenes. El modelo fue ideado por el profesor J. M. Greenberg

últimos estudios indican que una buena parte de los aminoácidos que se hallaran presentes en los cometas sobrevivirían el impacto, al igual que ocurre con los meteoritos. Por tanto, como sugirió por primera vez el profesor Juan Oró en 1961, los cometas pudieron depositar aminoácidos y otras moléculas prebióticas en nuestro planeta, facilitando así el origen de la vida.

Otro aspecto interesante de este trabajo concierne a la estequiometría de los aminoácidos; en su mayoría aparecen en sus dos formas enantioméricas: una es la imagen especular de la otra y, lo mismo que nuestras manos, no pueden superponerse. En el laboratorio se produce igual número de aminoácidos del tipo de la mano izquierda (L) como de la mano derecha (D). Sin embargo, los aminoácidos de los seres vivos son exclusivamente de configuración L. ¿Por qué?

Nuestro experimento se está reproduciendo utilizando luz ultravioleta *circularmente polarizada* para ver si se engendran más aminoácidos de una configuración que de la otra (exceso enantiomérico). Algo parecido podría ocurrir en el espacio. Sabido es que los aminoácidos hallados en meteoritos presentan un poco de exceso enantiomérico tipo L, con lo cual estas moléculas llegarían a La Tierra con cierta ventaja sobre las D.

La misión ESA-Rosetta podría aportar una prueba definitiva de la presencia de moléculas prebióticas en cometas, al estudiar *in situ* la composición del núcleo del cometa Wirtanen. Habrá que esperar hasta el año 2012.

Como productos de nuestros experimentos esperamos encontrar más moléculas prebióticas, pues hemos hallado estructuras que se asemejan a las bases del ADN, aunque nuestro cometido principal es entender los procesos que ocurren en el espacio, es decir, trabajamos en astronomía, no somos biólogos. Los bioquímicos han sido capaces de sintetizar moléculas esenciales para la vida más complejas, aunque, a modo de ejemplo, sigue siendo difícil sintetizar proteínas a partir de aminoácidos.

GUILLERMO M. MUÑOZ CARO
Observatorio Astronómico
de Leiden, Holanda

Estrés de la vegetación

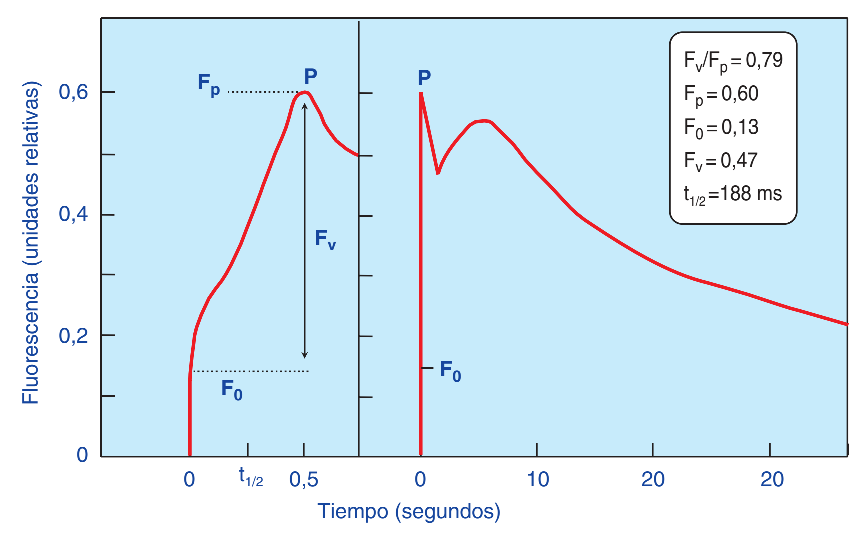
Concepto y tipos

El estrés en ecología se define como aquellas restricciones externas que limitan las tasas de adquisición de recursos, crecimiento o reproducción de los organismos. En la naturaleza, las plantas están expuestas a factores ambientales que limitan su desarrollo, ya sea de manera temporal o permanente. Estos factores limitantes se denominan factores estresantes o generadores de estrés.

Existen multitud de factores ambientales generadores de estrés en la vegetación. Destacan entre ellos las temperaturas extremas (estrés térmico), los niveles bajos y altos de radiación solar (estrés lumínico), la inundación y la sequía (estrés hídrico), la contaminación, la escasez de nutrientes (estrés nutricional), el exceso de sales (estrés salino) y los agentes patógenos.

Cuando una especie se encuentra sometida a niveles de estrés elevados, puede llegar a producirse su muerte, con incidencias potenciales en la propia población. A menudo, sin embargo, las plantas viven expuestas más o menos continuamente a una o más fuentes de estrés ambiental, sin consecuencias letales, aunque restringen su capacidad de adquisición de recursos, disminuyendo sus capacidades reproductivas, competitivas o ambas.

Inmersas en esta matriz ambiental de factores estresantes, las especies vegetales pueden responder de



1. Esquema de la curva de emisión de fluorescencia en las especies del género Spartina. F_0 = Fluorescencia basal; F_p = Fluorescencia pico; F_v = Fluorescencia variable ($F_p - F_0$); $T_{1/2}$ = Mitad del tiempo empleado en alcanzar F_p desde F_0

forma individual a las condiciones de estrés sostenidas en el tiempo mediante respuestas reversibles, o de forma poblacional mediante respuestas adaptativas. Se privilegian las adaptaciones que aumentan el rendimiento (número de descendientes aportados a las generaciones futuras) bajo las condiciones de estrés. Las respuestas de la vegetación al estrés muestran un espectro muy amplio, que abarca desde las de índole metabólica a las de carácter morfológico y estructural.

Las consecuencias del estrés ambiental pueden observarse frecuentemente a simple vista en la vegetación. No es extraño advertir fenómenos de clorosis foliar por escasez de algún nutriente o incluso hojas e individuos completos muertos como consecuencia de un estrés hídrico prolongado durante los veranos bajo clima mediterráneo. Otras veces, el estrés al que están sometidas las diferentes especies vegetales no se manifiesta de un modo patente.

Actualmente, debido al progreso técnico en la instrumentación de laboratorio es posible explorar los niveles de estrés fisiológico de la vegetación antes de que aparezcan síntomas externos. Así, son muchas las biomoléculas que han sido identificadas y son utilizadas como indicadores de niveles de estrés en diferentes rutas metabólicas.

Entre estas técnicas de exploración de los niveles de estrés sobresale, debido a la rapidez y facilidad a la hora de realizar las medidas, y por ser un método no destructivo, el análisis de la fluorescencia de la clorofila. Los efectos de la exposición a niveles altos de estrés en la vegetación suelen reflejarse directa o indirectamente en el funcionamiento del aparato fotosintético.

La energía radiante absorbida cursa a través de la cadena transportadora de electrones de la fotosíntesis. La energía que no puede ser utilizada por el aparato fotosintético se emite en forma de calor y fluorescencia. De esta manera, una planta expuesta a altos niveles de estrés que afecten directa o indirectamente a la funcionalidad de su aparato fotosintético emitirá más fluorescencia que otra no expuesta a factores estresantes. Gracias a esta emisión de energía en forma de fluorescencia, junto con la emisión de calor, las plantas eliminan el exceso de energía absorbida, evitando daños estructurales permanentes.

En la medición de la fluorescencia a temperaturas no extremas tras un período de adaptación a oscuridad distinguiremos, según el tiempo de registro, entre la cinética rápida, registrada en el primer segundo de iluminación, y la cinética lenta, que puede durar varios minutos hasta alcanzar la fase terminal.

En la cinética rápida destacan cinco parámetros que definen la curva de emisión de fluorescencia y sirven para cuantificar el estrés: fluorescencia basal (F_0), emitida en los primeros picosegundos de iluminación por los pigmentos antenas captadores de luz; pico de fluorescencia (F_p), emitido por las clorofilas de los centros de reacción de los fotosistemas II; fluorescencia variable (F_v), definida como F_p-F_0; eficiencia fotoquímica potencial o cociente F_v/F_p, que está próximo a 0,85 en plantas no sometidas a estrés, disminuyendo su valor en plantas estresadas; y mitad del tiempo

A. CONDICIONES NO ESTRESANTES

CLOROFILA* → FOTOSINTESIS
CLOROFILA* → EMISION DE CALOR
CLOROFILA* → FLUORESCENCIA DE LA CLOROFILA

B. CONDICIONES ESTRESANTES

CLOROFILA* → FOTOSINTESIS
CLOROFILA* → EMISION DE CALOR
CLOROFILA* → FLUORESCENCIA DE LA CLOROFILA

2. Posibles vías de la energía absorbida por las moléculas de clorofila en función del grado de estrés



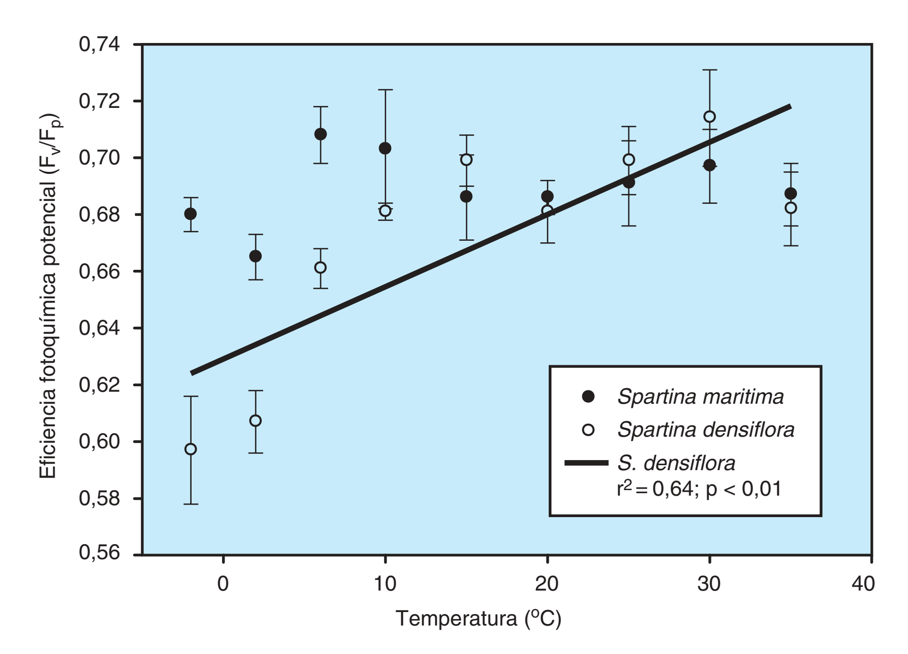
3. Spartina maritima *en las marismas del Odiel (Huelva)*

de transición de F_0 a F_p ($t_{1/2}$), que depende del estado de reducción de los aceptores de electrones del fotosistema II.

La fluorescencia clorofílica es una herramienta muy útil en la interpretación ecofisiológica de las respuestas de las diferentes especies a los factores ambientales estresantes. La interpretación de estos resultados se enriquece cuando combinamos el recurso a la fluorescencia con otras técnicas fisiológicas (intercambio gaseoso y potencial hídrico) y con medidas de la matriz medioambiental. En este sentido, los autores de este trabajo estudian actualmente las respuestas al estrés ambiental en vegetación de marismas mareales, ecosistemas dunares y pastizales mediterráneos.

Veamos un ejemplo de aplicación de esta técnica. En las marismas costeras del golfo de Cádiz aparecen en el mismo hábitat dos especies de gramíneas pertenecientes al género *Spartina*: *S. maritima*, una especie autóctona del continente europeo utilizada como herramienta biotecnológica en la creación y restauración de marismas, y *S. densiflora*, originaria de Sudamérica y que hoy invade desde el sudoeste de la península Ibérica las marismas europeas provocando una disminución de la biodiversidad vegetal.

Aunque emparentadas, manifiestan respuestas fisiológicas muy dispares frente a diferentes factores ambientales generadores de estrés. Mediante la técnica de la fluorescencia de la clorofila, los autores investigan el comportamiento de estas especies en los inviernos mediterráneos, caracterizados por altos niveles de radiación junto con bajas temperaturas (5-10 ºC) que potencialmente pueden ser una fuente de estrés para el aparato fotosintético. La respuesta de la eficiencia fotoquímica potencial —cociente entre la fluorescencia variable, F_v, y la fluorescencia pico, F_p— de ambas especies frente a la temperatura (ºC) —tras un tratamiento de 30 minutos a la temperatura correspondiente en oscuridad— nos muestra como *S. densiflora*, de origen subtropical, es más sensible a las temperaturas bajas que *S. marítima*, especie de latitudes medias. Una de las aplicaciones prácticas de este estudio es la predicción de la evolución de la invasión de las marismas europeas por parte de *S. densiflora*. La invasión de esta especie agresiva podría verse frenada en latitudes más altas por temperaturas bajas, según estas investigaciones; y, por otro lado, potencialmente favorecida por el incremento global de las temperaturas en el marco del cambio climático global.



4. Eficiencia fotoquímica potencial (cociente entre la fluorescencia variable, F_v, y la fluorescencia pico, F_p) de Spartina maritima *y* S. densiflora *frente a la temperatura (ºC) tras un tratamiento de 30 minutos a la temperatura correspondiente en oscuridad. Se observa que* S. densiflora *es más sensible que* S. maritima *a las temperaturas bajas*

M. Enrique Figueroa, Teresa Luque, Jesús M. Castillo, Alfredo E. Rubio-Casal, Susana Redondo y Miguel Delibes-Mateos
Dpto. Biología Vegetal y Ecología. Facultad de Biología. Universidad de Sevilla

Eloy M. Castellanos, Carlos J. Luque y F. Javier Nieva
Dpto. Biología Ambiental y Salud Pública. Facultad de Ciencias Experimentales. Universidad de Huelva

De cerca

Carles Borrego y Xavier Vila

Bacterias fotosintéticas del azufre

Desde la perspectiva del caminante, los lagos y lagunas que salpican nuestro entorno natural parecen a menudo simples masas de agua, estáticas y sin más interés que el que puedan despertar desde el punto de vista paisajístico. Lejos de tal visión monótona, estos ecosistemas son hábitats complejos donde la vida bulle al compás de continuos cambios físico-químicos que se suceden a lo largo del año. Las diferencias de temperatura y salinidad entre las aguas superficiales y las profundas convierten estas masas de agua en calidoscopios de gradientes, densidades y concentraciones de distintos compuestos químicos donde cada (micro)organismo ocupa su lugar y obtiene lo que necesita.

Entre la miríada de microorganismos que pululan en estas aguas destacan las bacterias fotosintéticas del azufre, que unen a su peculiar metabolismo fotosintético (que no genera oxígeno), una llamativa pigmentación (roja, verde o marrón) y una intensa actividad oxidadora de sulfhídrico (H_2S), un gas tóxico para la mayoría de los seres (incluidos los humanos), y de ahí que su consumo sea útil como proceso destoxificador del ambiente. La presencia de estas bacterias en un lago o laguna estratificada puede pasar desapercibida a simple vista. Debido a su intolerancia al oxígeno difícilmente las encontraremos en la superficie (una excepción sería la laguna Sisó, donde su masiva proliferación produce un paisaje surrealista) mientras que se desarrollarán masivamente allí donde puedan disponer de suficiente energía (luz) para la fotosíntesis y sulfhídrico del que obtener electrones. Ya que la luz proviene del sol y el sulfhídrico se genera en el sedimento del lago, ambos factores muestran gradientes opuestos. El compromiso entre ambas necesidades obliga a nuestros protagonistas a colonizar y crecer en láminas de agua de escasos centímetros de espesor, situadas a profundidades que oscilan entre los 2 y los 25 m.

En estas zonas, y oculta a nuestros ojos, la vida bacteriana hierve frenética, ofreciendo un espectáculo de colorido cambiante. Además, tanto por las condiciones físico-químicas como por el tipo de microorganismos que se desarrollan en ellas, estas capas de agua se han comparado con los primitivos ecosistemas acuáticos de la Tierra y, por tanto, pueden ser una ventana abierta a través de la cual bucear en nuestros orígenes. Orígenes bacterianos, por supuesto.

1. En la laguna Sisó (Bañolas, Gerona), la mezcla de la columna de agua durante el invierno hace aflorar a la superficie a las bacterias rojas del azufre, provocando una llamativa coloración de las aguas



2. Serie de muestras recogidas a diferentes profundidades en la laguna Salada de Chiprana (Zaragoza). El cambio de condiciones físico-químicas a 3,7 m de profundidad permite la proliferación masiva de bacterias fotosintéticas verdes del azufre



3. Cultivos de laboratorio de diferentes bacterias fotosintéticas del azufre aisladas a partir de muestras de agua. La variedad cromática es debida a la diferente composición en pigmentos de cada especie

4. Thiocystis *spp., una bacteria roja del azufre. Los glóbulos de azufre elemental producidos durante la oxidación del H_2S son claramente visibles en el interior de las células*

5. Pelodictyon clathratiforme*, una bacteria verde del azufre que forma redes tridimensionales*

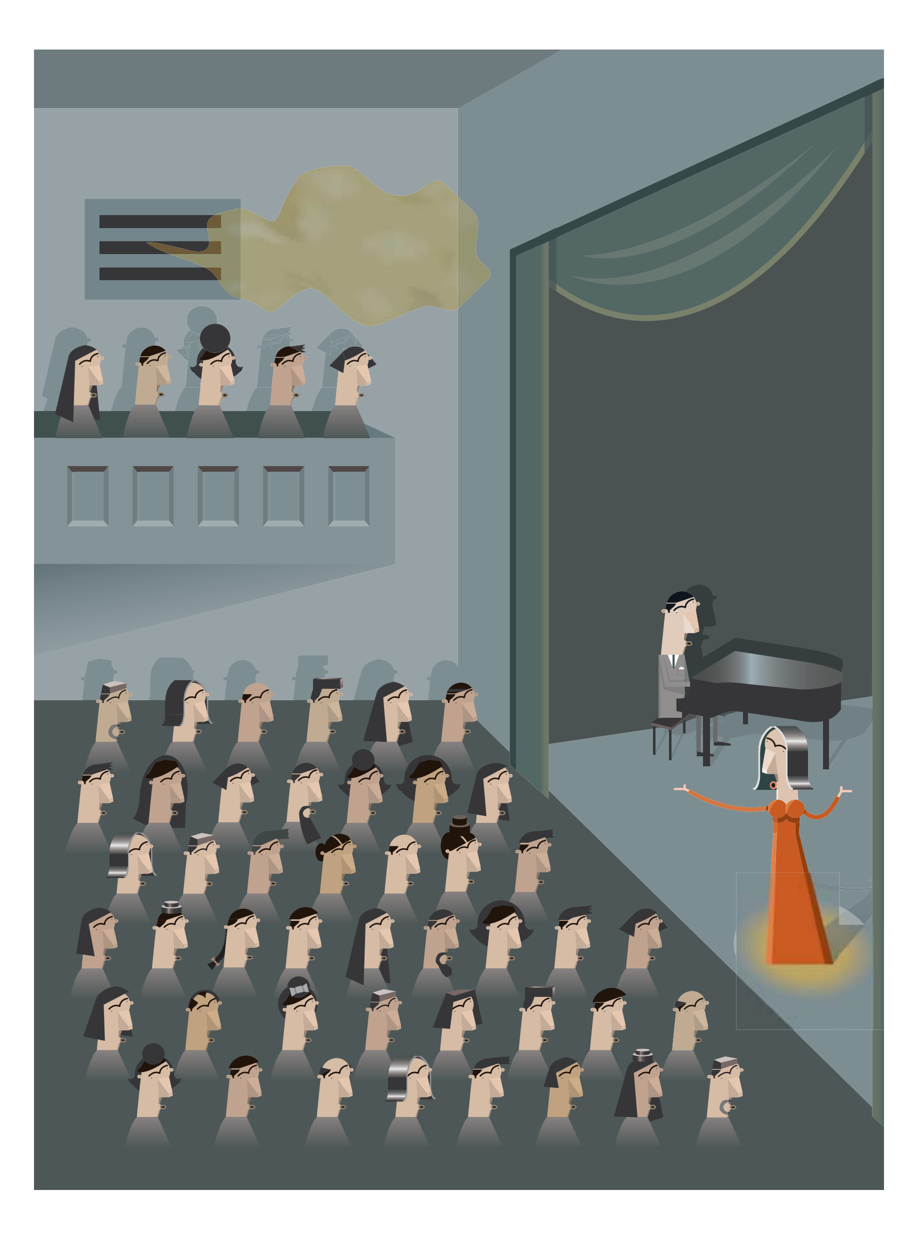
6. Las comunidades bacterianas que se desarrollan en profundidad alcanzan un grado notable de variedad. Aquí se muestra la comunidad bacteriana fotosintética del lago Round (Wisconsin, EE.UU.)

CARLES ABELLA, L. J. GARCIA-GIL Y XAVIER VILA (*fotografías*)

Sistemas técnicos de

Biólogos e ingenieros están elaborando sistemas de alerta precoz que detecten una agresión bioterrorista con el fin de neutralizar sus efectos

Rocco Casagrande



FRED RIX

Mayo del año 2000. Altos funcionarios del gobierno estadounidense seguían vigilantes la evolución de una nube de bacterias que cruza el Centro de Artes Escénicas de Denver, un complejo de siete teatros con un aforo total de siete mil plazas. Al cabo de una semana miles de personas habían muerto o agonizaban a causa de la infección, se cerraron las fronteras estatales de Colorado, comenzaban a escasear alimentos y medicinas y los hospitales dejaron de prestar asistencia, pues médicos y personal auxiliar cayeron enfermos y se agotaron los antibióticos.

Por suerte, aquello pertenecía al terreno de la ficción. Se trataba de un ejercicio informático que simulaba los efectos de un ataque biológico contra un objetivo dentro de EE.UU. Como parte de un ensayo llamado TopOff, sirvió de llamada de aviso para que los gobernantes no aguarden a que en las salas de urgencias empiecen a presentarse enfermos, si confían en acometer una defensa eficaz contra las armas biológicas. Los científicos ya están ideando toda una gama de sistemas de alarma temprana que alerten a las autoridades sanitarias de un ataque real. Esas técnicas comprenden biochips basados en el ADN y en los anticuerpos, así como "olfatos electrónicos" capaces de oler microorganismos letales.

alerta contra el bioterrorismo

¿Nos atacan?

La guerra biológica es insidiosa. Las nubes bacterianas o víricas transportadas ni se ven, ni despiden olor. Quienes inhalen esos agentes ignorarán que han sido atacados hasta caer enfermos, días después. Pero entonces podría ser demasiado tarde para recibir el tratamiento adecuado o para proteger a otros de la infección. Aunque la mayoría de los agentes biológicos no son muy contagiosos, en numerosos casos los infectados sin saberlo podrían transmitir la enfermedad.

Afortunadamente, el período de incubación de los agentes biológicos se extiende a lo largo de un intervalo temporal durante el cual los funcionarios de sanidad podrían poner en cuarentena y tratar a las víctimas, así como vacunar al resto de la población. Antes de que se manifiesten los síntomas, muchas de las enfermedades causadas por agentes biológicos son sensibles a la antibioterapia. Pero una vez aparecidos los síntomas, algunas víctimas no responderán al tratamiento.

La detección a tiempo reviste un interés crítico. Muchas de las enfermedades causadas por agentes de guerra biológica desencadenan unos síntomas iniciales, tales como fiebre y náuseas, que se confunden fácilmente con los que acompañan a una afección gripal. A los alumnos de medicina se les suele enseñar que "cuando resuenan los cascos, piensa en caballos, no en cebras", para que empiecen por descartar los trastornos comunes antes de considerar diagnósticos más exóticos. Aunque esa máxima ahorra tiempo y esfuerzos en la práctica diaria, podría inducir a los médicos a pasar por alto un ataque biológico. Pensando en ello se ha bautizado a ciertos detectores biológicos con la denominación coloquial de chips cebra, o chips C; advierten a los galenos de que anda suelta una cebra metafórica.

La guerra biológica puede desatarse contaminando los suministros de alimentos o de agua potable; también, mediante insectos portadores de patógenos, como los mosquitos. Pero no es probable que esos métodos afecten a miles de víctimas en un ataque aislado. Las armas biológicas alcanzan el nivel de la destrucción masiva (con unas bajas humanas potenciales parangonables con las de las armas nucleares) sólo cuando se diseminan en el aire en forma de aerosoles inhalables de partículas del tamaño de una micra. Estas minúsculas gotitas pueden flotar en el aire, cruzar largas distancias y alojarse en lo más profundo de los pulmones para causar peligrosas infecciones sistémicas.

Los agentes biológicos transportados por el aire son, empero, difíciles de detectar. Débese ello a su variedad: bacterias, virus o toxinas producidas por microorganismos. Pueden resultar letales, incluso en dilución extrema. Una persona sana aspira unos seis litros de aire por minuto; ciertos agentes patógenos pueden provocar una enfermedad aunque se inhalen sólo 10 microorganismos. Para proteger a las personas presentes durante cortos períodos en zonas contaminadas, un aparato debería capturar dos agentes patógenos por litro de aire, una tarea de ejecución harto difícil.

Los primeros detectores biológicos que funcionaron con éxito se limitaban a localizar nubes de partículas pequeñas. Algunas de esas máquinas (así, la XM2 del Ejército de EE.UU., que se experimentó en la guerra del Golfo) muestrean el aire de su entorno y están enlazadas a máquinas que recuentan las partículas cuyo tamaño corresponde al de las bioarmas. Si ese recuento supera cierto umbral, suena una alarma para que las tropas evacuen la zona. Otros detectores de partículas emplean lídar, un sistema parecido a un radar que emite un haz láser y luego detecta la luz que rebota en los objetos interpuestos en su camino. En tiempo seco, los dispositivos basados en el lídar funcionan a distancias de 50 kilómetros, pero no distinguen entre neblinas de agentes biológicos y nubes de polvo fino o humo.

Los sistemas lídar más recientes se apoyan en ciertas moléculas de las células vivas que fluorescen al ser excitadas por luz ultravioleta (UV). Esos aparatos de lídar UV excitan las partículas con un haz UV y esperan la fluorescencia procedente de la nube. Pero ni siquiera los lídares UV pueden distinguir los patógenos de las nubes de microorganismos inocuos, del polen o de penachos de esporas de mohos. Pese a esas limitaciones, los detectores de partículas son

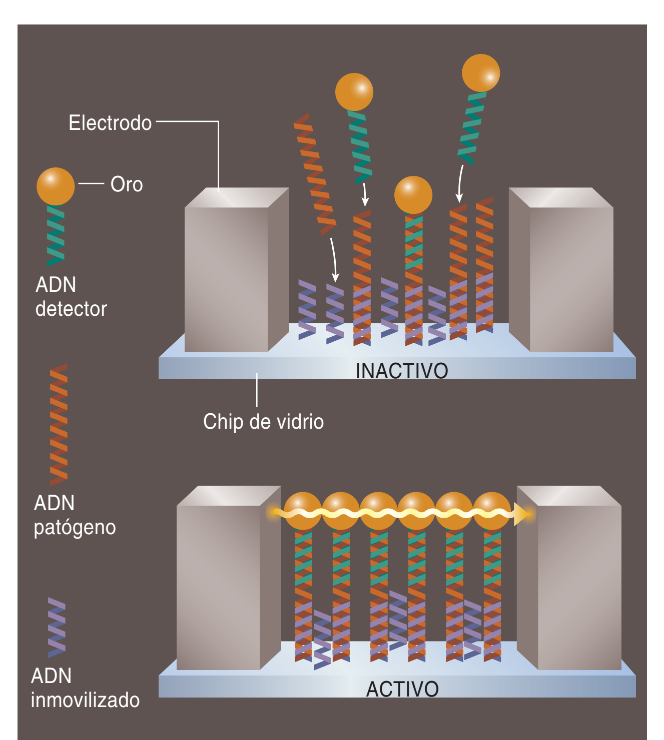
útiles para guiar a las tropas en su repliegue de zonas donde pudiera haber aerosoles biológicos dañinos. Podrían también desplegarse para señalar cuándo unos detectores más sensibles deben empezar a analizar muestras.

Una aguja en un pajar

Algunos de los detectores de armas biológicas más recientes distinguen los agentes patógenos de los microorganismos benignos u otras partículas basándose en su diferente constitución genética. Puesto que el ADN se halla en el interior de los microorganismos, hay que reventar las células para extraer la molécula. El sistema GeneXpert, de la empresa Cepheid, dispone de fragmentadores de células integrados; otros sistemas requieren que un técnico aísle el ADN.

Uno de los primeros chips de ADN se desarrolló en la Universidad del Noroeste. Se basa en la naturaleza complementaria de las dos hebras que constituyen la doble hélice del ADN. Esa estructura helicoidal semeja una escalera de caracol, cada uno de cuyos peldaños consta de dos subunidades o bases. La escalera se parte desde el centro cuando se hallan activos los genes o cuando una célula copia sus genes antes de dividirse. Cuatro bases constituyen los peldaños de la hélice: adenina (A), timina (T), citosina (C) y guanina (G). A siempre se une a T, y C siempre se empareja con G. Conocidas las secuencias de las bases de una hebra, por ejemplo ATCGCC, podemos predecir la secuencia complementaria de la otra hebra, TAGCGG en este caso.

El elemento sensor del sistema de la Universidad del Noroeste contiene hebras monocatenarias de ADN complementario de una secuencia corta de ADN específico de un patógeno dado. Las hebras se inmovilizan en un chip de cristal entre dos electrodos. Cuando el ADN del agente patógeno entra en el sistema, se adhiere a (se hibrida con) un extremo del ADN inmovilizado. Para detectar la hibridación, un especialista añade trozos de ADN con partículas de oro unidas, complementarios del otro extremo de la secuencia del ADN objetivo. En los puntos donde se unen las



1. EL BIOCHIP BASADO EN EL ADN detecta las secuencias génicas de un patógeno estableciendo un puente de partículas de oro entre dos electrodos. Ese puente cierra un circuito y se activa una alarma.

FRED RIX

secuencias de ADN portadoras de oro, cierran un circuito eléctrico y se activa la alarma.

Hay otros detectores basados en el ADN que se fundan en un método de multiplicación de secuencias específicas de ADN: la reacción en cadena de la polimerasa (RCP). En esta técnica, se calienta el ADN para romper los enlaces entre las dos bases que constituyen cada peldaño y separar las dos hebras de ADN. Luego, se enfría la solución y se agrega dos fragmentos cortos de ADN, los cebadores, diseñados para hibridarse específicamente con uno u otro extremo de la secuencia del ADN que intentan detectar. Las enzimas se anclan en los cebadores y los despliegan, copiando en cuatro las dos primitivas hebras de ADN. Podemos doblar el número de copias de la secuencia del ADN objetivo cada vez que repitamos el ciclo, hasta obtener el número requerido para la detección.

Incorporando moléculas fluorescentes en los fragmentos de ADN recién sintetizados, podemos seguir el proceso de multiplicación (amplificación) conforme avanza. Hay asimismo máquinas, llamadas cicladoras térmicas rápidas, que pueden efectuar cada ciclo de calentamiento y enfriamiento en menos de un minuto, facilitando 30 duplicaciones de secuencias de ADN muy raras en un plazo de media hora.

Pero tanto el sistema de cierre de circuito como el de RCP deben precargarse con reactivos específicos de cada patógeno concreto, lo que significa que los usuarios deben adivinar correctamente los agentes infecciosos que podría elegir un terrorista potencial. Para

Resumen/*Biodetectores*

- Los agentes de guerra biológica, incoloros e inodoros, pueden tardar días en provocar los síntomas. Por consiguiente, una población podría desconocer que es víctima de un ataque hasta que fuese demasiado tarde.
- Biólogos e ingenieros están desarrollando detectores consistentes en chips de anticuerpos o ADN que detectan patógenos. Se afanan también en la creación de dispositivos que “huelen” los olores emitidos por los microorganismos o los aditivos introducidos para convertirlos en armas.
- Los responsables gubernamentales deben decidir el mejor despliegue de los nuevos detectores de armas biológicas; carecería de sentido práctico, por ejemplo, instalar uno en cada esquina.

Despliegue de la defensa

Lo más difícil podría ser decidir cuándo, y dónde, emplear los detectores en una guerra biológica

UN ATAQUE BIOLÓGICO puede desencadenarse en cualquier momento y lugar. Los dementes obsesionados con una matanza brutal podrían esparcir una nube de agentes patógenos en una feria campestre, con la misma facilidad que soltar un agente patógeno en el metro durante una hora punta. (Aunque en el primer caso tendrían que elegir un día nublado: la luz solar intensa aniquila a la mayoría de los microorganismos.)

Desde el 11 de septiembre de 2001, el miedo a un ataque terrorista preocupa a los responsables políticos, encargados de prevenir tal catástrofe. Aunque la diversidad y abundancia de objetivos potenciales hace prácticamente imposible protegerlos todos, un despliegue adecuado de detectores biológicos reduciría la probabilidad de éxito de los ataques más insidiosos.

Los detectores disponibles de agentes biológicos resultan demasiado caros y requieren excesivos cuidados para que podamos instalar uno en cada esquina. Pero el sentido común nos dicta que ciertos eventos o lugares, por su importancia o por el número de víctimas potenciales, merecen una seguridad más rigurosa. El edificio del parlamento o las sedes centrales de ciertos organismos nacionales merecen una vigilancia biológica de 24 horas al día. Cabe esperar que la técnica progrese hasta un punto en que los detectores de agentes biológicos alcancen la finura, economía y autonomía suficientes para extenderlos por todos los edificios públicos de las principales ciudades.

Por desgracia, ninguno de los detectores de agentes biológicos ahora disponibles están capacitados para distinguir de los inocuos los microorganismos letales y controlar la presencia de agentes patógenos en sus alrededores. Algunos aparatos no pueden recoger las muestras automáticamente y necesitan la intervención de un técnico. Otros pueden sacar automáticamente muestras de aire o agua, pero sólo si los maneja un operario, quien debe ordenar la recogida de muestras a intervalos que dejen tiempo suficiente para el análisis. Los operarios podrían tomar muestras en momentos establecidos —cada hora o en cuanto se haya analizado la muestra anterior—, pero una nube de agentes biológicos podría pasar por encima de una zona o ser dispersada en cuestión de minutos. Si las muestras se toman en momentos inadecuados, un ataque podría pasar inadvertido.

Hay detectores combinados con sistemas de lídar o contadores de partículas que toman muestras sólo cuando se trata de una nube de partículas de un tamaño prefijado. Sistemas similares podrían emplearse en ensayos de la salubridad del agua de la red de suministro de edificios importantes: si el recuento de partículas en la red despuntase, el aparato desviaría una muestra que luego se analizaría.

El ideal sería un sistema capaz de controlar de un modo continuo su entorno, analizar las muestras rápidamente y funcionar a bajo coste. Pero nos hallamos lejos de haberlo pergeñado. Mientras llega ese momento, epidemiólogos y expertos en informática han venido trabajando codo con codo en la creación de una base de datos para controlar los síntomas de los pacientes que acudan a las salas de urgencias y detectar los primeros indicios de un ataque biológico. Los protocolos se basan en instrumentos de mano que los médicos emplean para cargar la información de los síntomas en una base de datos capaz de seleccionar los patrones patológicos coherentes con la punta de lanza de un ataque biológico; por ejemplo, número desproporcionado de enfermedades gripales o afines fuera de la temporada de gripe.

Uno de esos sistemas —que responde a las siglas LEADERS (de “Lightweight Epidemiology Advanced Detection and Emergency Response System”)— se viene aplicando desde el año 2000 para explotar las bases de datos de los hospitales cercanos a convenciones de partidos políticos y encuentros de fútbol, entre otros acontecimientos. Conscientes del hecho de que la mayoría de la gente no va al hospital cuando cree tener la gripe, los programadores están añadiendo métricas a la base de datos de LEADERS, tales como ventas de medicinas sin receta, bajas por enfermedad y recibos de peaje (las personas enfermas no suelen conducir el automóvil).

En teoría, esas bases de datos podrían registrar sin cesar información sobre enfermos de todo el país, de modo que los ataques pudieran detectarse precozmente, con independencia de dónde, cómo y cuándo se produjeran.



EL SISTEMA DE DETECCION BIOLOGICA a Larga Distancia del Ejército de EE.UU. funciona a bordo de un helicóptero Black Hawk. Este tipo de detectores de partículas lidáricos se acopla a biochips capaces de distinguir las partículas microbianas inocuas de las propias de las armas biológicas.

LABORATORIO NACIONAL DE LOS ALAMOS

salvar este escollo, la compañía Ibis Therapeutics y la Science Applications International Corporation han desarrollado el sistema “Evaluación Genética de Identificación de Riesgos Biológicos por Triangulación” (TIGER). Como muchos otros chips de ADN, el TIGER amplifica el ADN objetivo mediante RCP. Pero difiere, no obstante, en que emplea unos cebadores que se hibridan con un segmento de ADN que interviene en el control de la síntesis de proteínas, proceso clave del mecanismo celular. Con todo, el TIGER puede alcanzar una sensibilidad exquisita porque las secciones entre los cebadores varían tanto, que casi todos los microorganismos poseen una secuencia exclusiva. Los técnicos analizan entonces esas secuencias multiplicadas sirviéndose de un espectrómetro de masas, para compararlas con una base de datos de pautas extraídas de todos los microorganismos conocidos, y así identificar el agente.

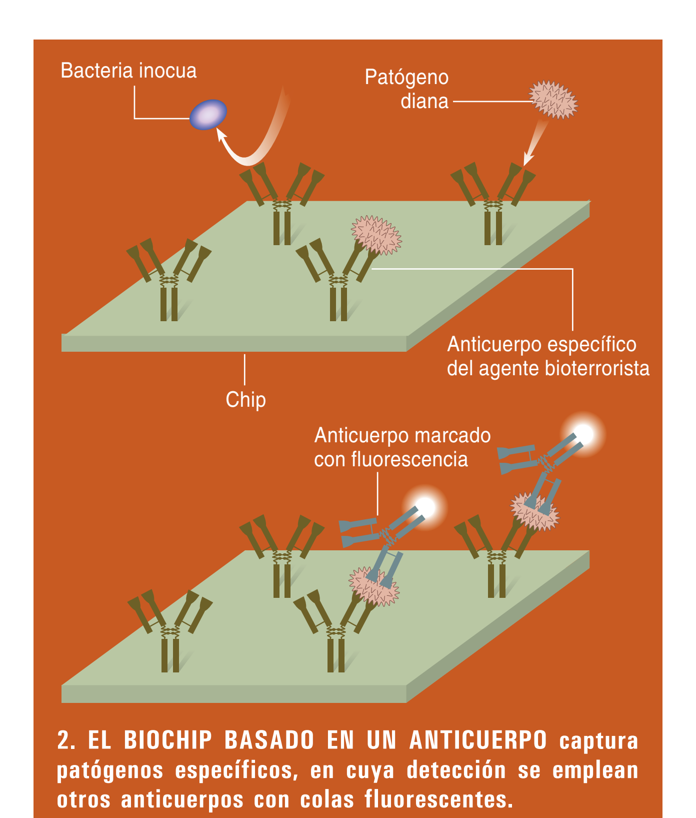
Ahora bien, los dispositivos basados en el ADN tienen sus limitaciones. No pueden detectar toxinas, que carecen de ADN, y su media hora de tiempo de reacción los hace demasiado lentos para alertar a la población de la llegada de una nube de agentes patógenos con tiempo para evacuar.

Un canario en una mina de carbón

Con chips basados en anticuerpos, moléculas en forma de Y producidas por el sistema inmunitario que se unen a moléculas objetivo específicas sitas en la superficie de los invasores, pueden superarse esos obstáculos. Puesto que los anticuerpos pueden detectar moléculas en la superficie de los microorganismos, no hace falta un tiempo adicional para reventar las células diana. Pueden, asimismo, descubrir toxinas y microorganismos enteros.

Los anticuerpos son el núcleo de Raptor, un sistema de detección para guerra biológica diseñado por el Laboratorio de Investigación Naval de EE.UU. Se encuadra entre “los contrastes sándwich”: los agentes patógenos diana se adhieren a anticuerpos contenidos en el chip y son detectados cuando aparecen emparedados (de ahí el apelativo) entre otra capa de anticuerpos marcados con tinciones fluorescentes. El Raptor puede actuar sobre varios patógenos a la vez, ya que admite coloraciones de diversos tipos de anticuerpos, específico cada uno de un arma biológica diferente. El sistema Origen de Igen detecta también los agentes patógenos por contraste sándwich, aunque en vez de tinciones fluorescentes emplea una sustancia que emite descargas luminosas cuando se expone a un campo eléctrico. La luz es más brillante que la fluorescencia normal; posibilita el análisis de muestras que contengan sólo unos pocos agentes patógenos. Además, uno de los anticuerpos está sujeto a una superficie que permite concentrar los patógenos objetivo antes de la detección.

En Surface Logix hemos colaborado con la compañía Radiation Monitoring Devices en el desarrollo de técnicas utilizables para captar patógenos de modo continuo. La máquina, que puede conectarse a un muestreador de aire, mezcla cualquier partícula presente en la muestra de aire con una solución de cuentas magnéticas microscópicas. Cada perla de éstas se recubre de anticuerpos marcados por fluorescencia que se unen a un microorganismo concreto.



2. EL BIOCHIP BASADO EN UN ANTICUERPO captura patógenos específicos, en cuya detección se emplean otros anticuerpos con colas fluorescentes.

FRED RIX

La corriente de muestra que contiene las cuentas fluye en sentido descendente por un canal microscópico de la anchura de un cabello humano, donde se reúne con una corriente limpia exenta de microorganismos. Ambas corrientes fluyen una junto a otra sin mezclarse, hasta que topan con una horquilla dentro del canal. Justo antes de ésta se ha instalado un imán que lanza a las cuentas magnéticas, y a los agentes patógenos unidos a ellas, hacia la corriente limpia. Esta fluye entonces hacia el interior de un detector que registra la presencia de agentes patógenos en razón de la fluorescencia de los mismos.

Nuestro sistema ofrece una ventaja interesante: separa los agentes patógenos objetivo de los miles de microorganismos inofensivos que concurren en una muestra dada. El humo y otros contaminantes ambientales que haya en la muestra no afectan a la de-

El autor

ROCCO CASAGRANDE trabaja para la compañía Surface Logix, de Brighton (Massachusetts), donde diseña y ensaya detectores de agentes biológicos. Entre otros servicios prestados en el ámbito de la sanidad pública, forma parte de la Comisión de Control, Verificación e Inspección de las Naciones Unidas, encargada de certificar el desarme biológico y químico iraquí.

tección, pues las microcuentas son lanzadas hasta la corriente limpia antes de la fase de detección por fluorescencia. Además, la máquina toma constantemente muestras del entorno y las analiza en tiempo real.

Otros sistemas recurren a los anticuerpos para captar agentes patógenos a su paso e introducirlos en dispositivos vibratorios: cristales de cuarzo, tenues membranas o voladizos microscópicos. Cuando esos dispositivos capturan patógenos, se doblan y se aminoran sus vibraciones; el cambio operado se detecta por métodos electrónicos.

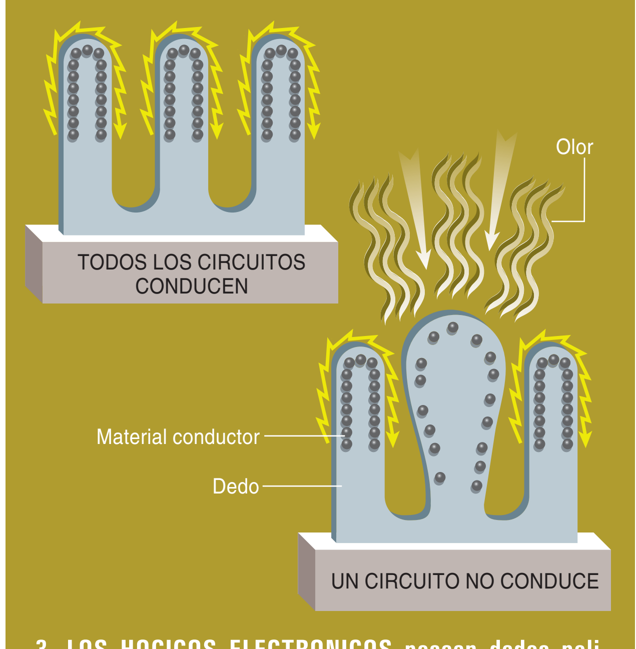
Olfateando invasores

Los dispositivos que hemos venido describiendo se encuentran en uso o se espera contar con ellos de aquí a pocos años. Pero no cesa el desarrollo de técnicas nuevas y más potentes.

Se están adaptando los llamados hocicos electrónicos (empleados en la localización de explosivos y armas químicas) para olfatear bombas biológicas. Uno de ellos, el Cyranose, que fabrica Cyrano Devices, consta de un conjunto de espigas hechas de polímeros ligeramente distintos. Cada espiga polimérica está preparada para absorber una sustancia química específica que provoca su hinchamiento. Todas ellas contienen copos de material eléctricamente conductor. Cuando las espigas no están hinchadas, los copos se hallan lo bastante cercanos entre sí para conducir electricidad; al hincharse, los copos se separan y el circuito se abre, emitiéndose una señal positiva. Para cada olor existe un patrón de circuitos interrumpidos diferente. En los laboratorios se trabaja en la creación de hocicos capaces de captar los metabolitos desprendidos por bacterias peligrosas o por sustancias químicas, como son los estabilizadores que suelen formar parte de las armas biológicas. Se espera dar con un patrón peculiar para cada agente biológico.

En un planteamiento muy innovador, la compañía BCR Diagnosis emplea esporas, formas latentes de las bacterias, para avisar de la presencia de armas biológicas. Cuando las bacterias penetran en el detector, su metabolismo normal hace que un nutriente inactivo pase a ser activo, permitiendo la germinación. Se trata de esporas genéticamente manipuladas para emitir luz al sufrir esa transformación; de ese modo, el detector registra la presencia del agente patógeno. Por desgracia, el dispositivo detecta las bacterias, nocivas o no. Pero podría adaptarse diseñando unos nutrientes inactivos específicos que serían convertidos en activos sólo por las bacterias de los tipos más probablemente usados en la guerra biológica.

Ahora bien, un terrorista inteligente podría burlar incluso al mejor de los detectores, creando por ingeniería genética unos microorganismos, de suyo inocuos, capaces de producir toxinas letales. El detector ideal debería reaccionar ante la presencia de un arma biológica cual si se tratara del propio objetivo de ésta, aunque con mayor celeridad. A tal fin, la Agencia de Investigación Avanzada para la Defensa respalda investigaciones sobre biodetectores con intervención de células humanas, animales y vegetales. El concepto



3. LOS HOCICOS ELECTRONICOS poseen dedos poliméricos que se hinchan al percibir un olor particular. Con la hinchazón se separan briznas de material conductor alojadas en los dedos y se interrumpe un circuito eléctrico, disparándose una alarma.

FRED RIX

subyacente de un detector de esa clase estriba en que un agente patógeno humano debe ser dañino al menos para un tipo de célula humana; la medición de la mortandad celular en el detector evidenciaría la presencia de un agente patógeno nocivo en el entorno.

Pese a la capacidad destructora de las armas biológicas, ningún país ni grupo terrorista las ha manejado aún para matar miles de personas. En principio, los biodetectores pueden ayudar a proteger a las poblaciones frente a tan improbable suceso. No obstante, pueden también cumplir otras misiones. Podrían aplicarse a la identificación de alimentos contaminados o al diagnóstico de enfermedades infecciosas en los centros hospitalarios. Asimismo, los instrumentos que miden las reacciones celulares podrían emplearse para evaluar la vulnerabilidad de las células cancerosas a distintos fármacos, facilitando una consecución más rápida de las terapias potenciales. De ese modo, los escudos, que no las espadas, se trocarían en rejas de arado.

Bibliografía complementaria

AMERICA'S ACHILLES' HEEL: NUCLEAR, BIOLOGICAL AND CHEMICAL TERRORISM AND COVERT ATTACK. Richard A. Falkenrath, Robert D. Newman y Badley A. Thayer. MIT Press, 1998.

BIOLOGICAL WARFARE: MODERN OFFENSE AND DEFENSE. Dirigido por Raymond A. Zilinskas. Lynne Rienner Publishers, Boulder, Colo., 1999.

Defensa y vigilancia

Dos son los principales factores de defensa contra el terrorismo biológico, a saber, unos sistemas de eficacia demostrada y una población bien entrenada

Stephen S. Morse

En el otoño del año pasado, cuando los médicos diagnosticaron carbunco a un paciente de Florida, de nombre Robert Stevens, sospecharon en un principio que se hallaban ante un caso natural, aunque poco común, de la enfermedad. Pero cuando la infección afectó a un compañero de trabajo del anterior, el país se puso en alerta. Al final murieron cinco personas, pero el reconocimiento rápido de que las primeras infecciones por carbunco resultaban de una siembra intencionada de bacterias salvó, sin duda, muchas vidas: los infectados fueron diagnosticados y tratados a tiempo y los responsables aislaron el correo contaminado de carbunco.

Durante mucho tiempo, los gobiernos federal y locales consideraron al bioterrorismo un asunto policial. Pero tanto el episodio del carbunco como las recientes simulaciones de siembras simultáneas de viruela en Atlanta, Philadelphia y en la ciudad de Oklahoma y de un ataque de peste en Denver ponen de relieve lo que debería ser obvio: el bioterrorismo constituye primero y ante todo un asunto de salud pública. Por ahora y para el futuro inmediato, la primera señal de un ataque bioterrorista (como en el brote natural de una enfermedad contagiosa peligrosa) sería la comparecencia de afectados en las salas de urgencias, y no el sonido de un aparato de alarma de técnica punta alertando del lanzamiento de un agente patógeno en un lugar público. En particular, el ejercicio de la viruela mostró que el sistema de sanidad pública no está preparado para la gran cantidad de personas que enfermarían en el peor de los casos, sin mencionar las demandas de atención de los "medrosos", los que simplemente temerían estar afectados.

Sea un brote morboso resultado de bioterrorismo o de causas naturales, en la preparación estribará la diferencia entre una amenaza rápidamente neutralizada y una crisis sanitaria generalizada. Y los principales responsables de esa diferencia son los defensores en primera línea de la sanidad pública: médicos, enfermeras y otros al cuidado de los pacientes recién ingresados; investigadores de laboratorio encargados de determinar la causa de las patologías; y funcionarios de sanidad responsables de la protección de poblaciones enteras. El control sanitario depende de la capacidad de todos esos asistentes para reconocer que algo inusual y acaso peligroso está en curso y movilizar las personas y recursos que mejor puedan limitar la expansión del morbo. Requiere también disponer de planes de acción a mano que definan con nitidez las misiones y tareas de los equipos responsables de la sanidad pública del país.

Un sistema de alerta precoz efectivo requiere tres elementos. Empezando por el "reconocimiento clínico". El sistema necesita médicos capaces de identificar una dolencia desacostumbrada, que prescriban las pruebas necesarias para un diagnóstico definitivo si los síntomas parecen atípicos e informen de esos síntomas, con unos resultados de laboratorio inquietantes, a los departamentos locales o estatales de sanidad. En el primer caso de Florida, los médicos sospecharon inicialmente de una meningitis, pero los análisis minuciosos revelaron que la meningitis se debía al carbunco —la mitad de las víctimas de carbunco por inhalación contraen también meningitis—, lo que los médicos de Stevens pusieron sin tardanza en conocimiento de la administración sanitaria.

Pero sería poco realista confiar en que todos y cada uno de los médicos relacionen los síntomas de un paciente con un brote. Un planteamiento mejor es entrenar a todos los clínicos en la "vigilancia sindrómica": buscar activamente e informar de ciertos síndromes, tales como trastornos similares a la gripe o erupciones, comunes con los patógenos potenciales de bioterrorismo. En la mayoría de los casos, los análisis de laboratorio determinarán que se trata de una patología habitual. La vigilancia sindrómica sobre las enfermedades de corte gripal detectará, obviamente, la gripe, lo que encierra ya un valor de por sí, puesto que las cepas gripales pandémicas son un tema de gran preocupación. Pero los agentes potenciales de bioterrorismo, pensemos en el carbunco pulmonar o en la peste contraída por vía respiratoria, comienzan también con síntomas gripales.

Además, los entes locales o regionales pueden controlar otros y más sutiles indicios de un brote. Las bruscas demandas de medicinas en las farmacias, las bajas en escuelas y lugares de trabajo y los síntomas concretos que aparezcan en los hospitales pueden, todos, rastrearse y servir de aviso sobre la necesidad de ulteriores investigaciones.

En 1993 puse en marcha con mis colaboradores el Programa de Control de Enfermedades Emergentes (ProMED), concebido para promover la vigilancia mundial de enfermedades contagiosas y, en especial, para buscar brotes de enfermedades nuevas. Los indicios de un camino que nos condujera a ese objetivo nos llegaron el año siguiente. Jack Woodall y yo desarrollamos el correo electrónico para ProMED. Ese sistema de correo electrónico abierto, ahora administrado por la Sociedad Internacional para las Enfermedades Infecciosas, permite a todos los interesados, en cualquier lugar del mundo, informar de observaciones clínicas. Ese correo se edita y evalúa científicamente antes de enviarlo a los 250.000 suscriptores, entre los que se cuentan expertos en patología, que pueden remitir comentarios y actuar. Sin embargo, no hay un sistema de respuestas formales, aunque desde luego la Organización Mundial de la Salud controla el

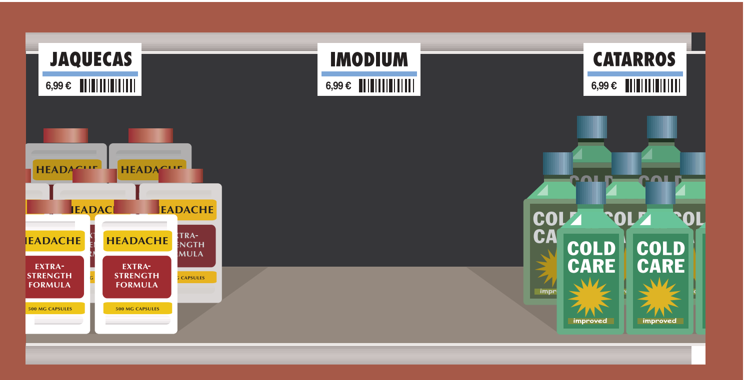
El autor

STEPHEN S. MORSE, virólogo de profesión, acuñó en 1988 la expresión "virus emergentes". Se halla adscrito al departamento de epidemiología de la universidad de Columbia.

correo electrónico de ProMED y otras fuentes y posee un sistema para avisar a los representantes locales y recomendar ulteriores investigaciones. Un control mundial más comprensivo, similar al de meteorología planetaria, mejoraría nuestra capacidad para descubrir cualquier tormenta que asomara por el horizonte y reaccionar a tiempo.

Incluso casos de enfermedades muy inusuales, así el carbunco por inhalación o el Ebola, deberían provocar investigaciones epidemiológicas ulteriores (incluyendo la averiguación de cómo se contrajo la enfermedad), que son la segunda característica esencial de los sistemas de alerta temprana. Por desgracia, pese al sentido de la responsabilidad y la preparación del personal de los Centros para Control y Prevención de Enfermedades (CCPE) y de los departamentos de sanidad pública locales, el actual sistema es insuficiente: la salud pública sigue siendo una labor de parcheo, variable de un lugar a otro.

La tercera componente estriba en la capacidad de los laboratorios. Su intervención resulta imprescindible para identificar agentes patógenos específicos en las primeras etapas de una investigación y para determinar si una muestra tomada de un paciente o un lugar contiene o no un agente. Las técnicas de epidemiología molecular, capaces de identificar cepas concretas de un agente patógeno basándose en las variaciones moleculares, son también inestimables para la medicina forense. Un análisis molecular podría determinar, por ejemplo, si todos los contagios por carbunco de 2001 se debieron a una misma subcepa, sugiriendo la implicación de una persona o grupo.



LOS ARTICULOS AGOTADOS en las farmacias pueden ser un indicio de la difusión de una enfermedad. Después de que los funcionarios de la sanidad pública se dieran cuenta en Milwaukee, en 1993, de que el antidiarreico Imodium había desaparecido de los anaqueles de las boticas, descubrieron que el agua contaminada con el parásito *Cryptosporidium* había infectado a unas 400.000 personas.

Un primer paso necesario es una mejor vigilancia sanitaria con capacidad de reacción. Pero se requiere avanzar más: el sistema de sanidad pública se está sometiendo a prueba con intensidad creciente en una variedad de emergencias, desde huracanes hasta olas de calor, y su papel revestiría importancia capital en el infortunado caso de terrorismo químico o radiológico, además del biológico. La sanidad pública forma parte de la infraestructura nacional no menos que los puentes y las carreteras; cualquier eslabón débil tiene que ser motivo de atención.

Dicho esto, hay algunas buenas noticias que consignar. Desde 1999 el CCPE está desarrollando la Red de Laboratorios de Reacción frente al bioterrorismo, como complemento del sistema de laboratorios de sanidad pública regular. Esa red incluye laboratorios de microbiología clínica en todo el país, que efectúan diagnósticos básicos y pueden cultivar e identificar algunos patógenos. A escala nacional existen laboratorios más especializados, que integran un sistema de "referencias ascendentes". Así, un laboratorio de nivel inferior enviaría muestras no resueltas o sospechosas a los situados en un escalón por encima y dotados de mejores medios para examinar materiales inusuales. En la cumbre se encuentran los laboratorios del CCPE y el Instituto de Investigaciones Médicas de Enfermedades Infecciosas del Ejército de EE.UU.

Desde el 11 de septiembre y los ataques de carbunco subsiguientes que conmovieron a EE.UU., el gobierno ha estado encarando la necesidad de mejorar la prevención ante el bioterrorismo. A la inauguración de la nueva Oficina de Preparación para la Salud Pública dentro del Departamento de Sanidad y Servicios Humanos en octubre de 2001 siguió en enero una asignación federal suplementaria de 2900 millones de dólares para subvenir la prevención ante el bioterrorismo. El grueso de ese dinero ayudará a las administraciones regionales a mejorar sus infraestructuras sanitarias. Entre las partidas se cuentan las asignadas a técnicas para mejorar la vigilancia sanitaria, así como personal cualificado —a menudo el recurso más escaso— para aplicar esas técnicas, establecer diagnósticos y manipular sin peligros material de alto riesgo. Otra prioridad es la ampliación del número de laboratorios capaces de identificar rápida y fiablemente las amenazas más importantes, tales como carbunco, viruela, peste, botulismo y tularemia.

Además, el CCPE recibirá 116 millones más, la mayoría destinados a modernizar los laboratorios. Asimismo, la Agencia mejorará su Red de Alerta Sanitaria Electrónica, que mantiene en contacto entre sí los departamentos sanitarios locales y estatales y el personal clínico en lo referente a las amenazas morbosas activas. Se ampliará la Reserva Farmacéutica Nacional: el número de "Paquetes de emergencia" —50 toneladas de botiquines (jeringas, vendas, caretas respiratorias, antibióticos) listos para ser distribuidos en los lugares damnificados— aumentará desde los ocho actuales hasta doce. Y con esos fondos se adquirirá un suministro de vacuna antivariólica suficiente para toda la población, en caso necesario. Un brote de viruela es muy improbable; pero sus consecuencias alcanzarían tal magnitud que se hace necesario prevenirlo.

Identificado un morbo, lo siguiente es contenerlo y tratar a los expuestos al mismo. Pero esto, también, depende del control y las comunicaciones. ¿Dónde se concentran los casos? ¿Qué medicamentos hacen falta y dónde? ¿Cómo pueden los equipos de descontaminación desintoxicar del mejor modo una zona dada, y qué zonas son prioritarias? ¿Qué pruebas materiales pueden reunirse acerca del agente patógeno que pudieran conducir hasta los responsables del ataque? ¿Qué medidas de cuarentena, si cabe, deben considerarse? Es ineludible que se comparta información tanto entre los departamentos sanitarios locales, estatales y federales como entre las comunidades encargadas de la salud pública y los encargados de los servicios policiales.

La infraestructura sanitaria pública no es meramente una componente esencial de la biodefensa; pudiera muy bien constituir la *única* componente en las primeras fases de una reacción ante un ataque bioterrorista. Los brotes infecciosos son frecuentes y las condiciones globales sugieren que la aparición y propagación de esas enfermedades aumentarán en un futuro próximo. A la manera de una nueva pandemia de fiebre amarilla, algunas pueden difundirse rápidamente y con fuerza devastadora. Un aspecto afortunado de la inversión en defensa biológica es que paga buenos dividendos: surja una enfermedad de modo natural o por siembra premeditada, la preparación de la sanidad pública puede salvar vidas en cualquier caso.

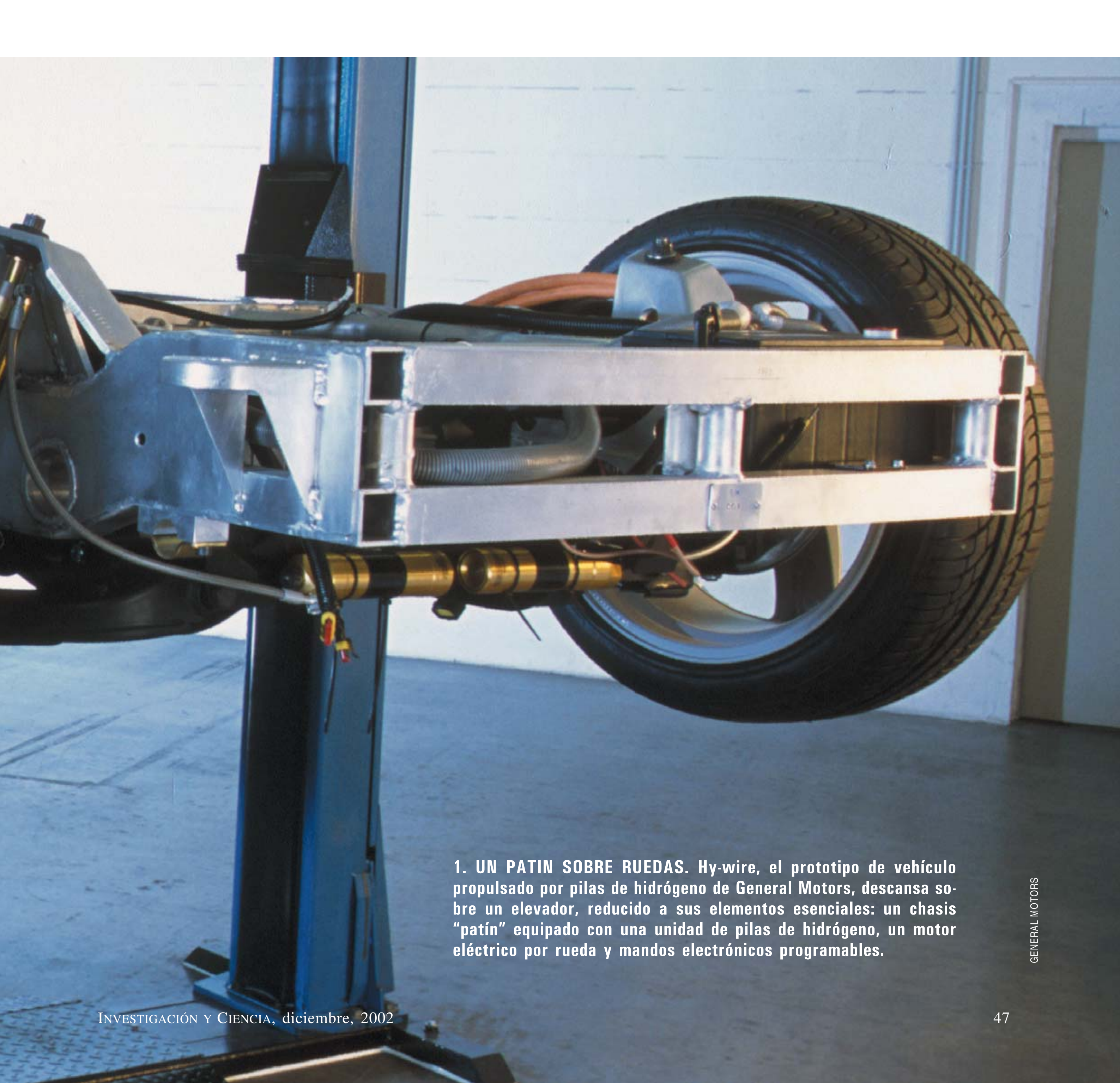
FRED RIX

El vehículo del cambio



Los coches de pilas de combustible podrían catalizar un futuro más limpio

Lawrence D. Burns, J. Byron McCormick
y Christopher E. Borroni-Bird



1. UN PATIN SOBRE RUEDAS. Hy-wire, el prototipo de vehículo propulsado por pilas de hidrógeno de General Motors, descansa sobre un elevador, reducido a sus elementos esenciales: un chasis "patín" equipado con una unidad de pilas de hidrógeno, un motor eléctrico por rueda y mandos electrónicos programables.

GENERAL MOTORS

Cuando Karl Benz sacaba en 1886 del taller el coche a motor que había patentado, ponía en movimiento al mismo tiempo otras ruedas: las de un gran cambio histórico. La aparición del automóvil condujo a profundas transformaciones en las costumbres y en la economía mundial, que nadie habría podido entonces ni imaginar. La progresiva generalización de un transporte personal asequible no sólo hizo más llevadera la vida; gracias a ella nació una compleja infraestructura industrial que dio forma a la sociedad moderna.

La automoción puede hoy desencadenar una nueva revolución: la utilización como combustible del hidrógeno en lugar del petróleo. Un automóvil propulsado por pilas de combustible —donde los átomos de hidrógeno se escinden en protones y electrones que impulsan motores eléctricos sin emitir residuo más nocivo que el vapor de agua— sería mucho más respetuoso con el entorno. Además de contaminar menos, los coches ganarían en seguridad y comodidad, se adaptarían mejor a los gustos particulares e incluso se abaratarían. Por si fuera poco, los vehículos de este tipo vertebrarían el cambio hacia una economía basada en una fuente de energía, el hidrógeno, "más verde". Se modificaría de manera notable el uso y la producción de la energía. Los coches y camiones movidos por pilas de hidrógeno garantizarían un futuro donde se mantendría indefinidamente la libertad de desplazarse por propia cuenta sin amenazar el entorno ni agotar los recursos naturales del planeta.

Concurren varios factores que hacen más verosímil este profundo cambio. El motor de combustión interna alimentado por petróleo, pese a su refinamiento, fiabilidad y economía, está llegando a sus límites. No obstante su continuo perfeccionamiento, sólo convierte de un 20 a un 25 por ciento de la energía, que contiene el combustible, en potencia motriz aplicada a las ruedas. Y aunque la industria de automoción haya logrado que se reduzcan las emisiones nocivas desde el decenio de 1960, cuando no había regulación alguna —en EE.UU., ha disminuido desde entonces en un 99 por ciento la emisión de hidrocarburos, en un 96 la de monóxido de carbono y en un 95 la de óxidos de nitrógeno—, la constante producción de dióxido de carbono preocupa por su capacidad de alterar el clima de la Tierra.

Aunque se apliquen técnicas nuevas, se espera que el rendimiento de los motores de combustión interna llegue a un techo de en torno del 30 por ciento; en cualquier caso, seguirán descargando dióxido de carbono a la atmósfera. Compárese con un vehículo que usara como combustible el hidrógeno: dado que su rendimiento sería casi el doble, requeriría sólo la mitad de energía. Más importante aún: las pilas que lo moverían sólo desprenderían como subproductos agua y calor. Además, el hidrógeno puede extraerse de diversos combustibles y fuentes energéticas: del gas natural, del alcohol etílico, del agua (por electrólisis, que requiere el uso de electricidad) y de sistemas de energías renovables. Conscientes de todas estas posibilidades, una larga serie de empresas de automoción se dedican con ahínco al desarrollo de vehículos propulsados por pilas de combustible, entre ellas DaimlerChrysler, Ford, General Motors, Honda, PSA Peugeot-Citroën, Renault-Nissan y Toyota.

Resumen/*Pilas de combustible hidrógeno*

- Las pilas de combustible convierten, con suma limpieza, el gas hidrógeno en electricidad y posibilitan la existencia de vehículos no contaminantes propulsados por motores eléctricos. Combinadas con la dirección, freno y aceleración por mandos electrónicos, las pilas de combustible permiten dividir el vehículo en dos partes: un chasis rodante y una carrocería (en principio intercambiable) con un interior más amplio.
- La perspectiva de unos vehículos limpios movidos por pilas de hidrógeno promete, asimismo, el advenimiento de una nueva economía energética y una mejor conservación del medio sin menoscabo de la movilidad personal.
- Un círculo vicioso: para producir en gran cantidad vehículos de pilas de hidrógeno es preciso disponer del combustible que necesitarían, pero difícilmente se construirá la infraestructura requerida si no hay en circulación un número considerable de estos vehículos.

El mundo y el automóvil

El impacto ambiental de los vehículos de motor tiende a crecer a medida que se extiende su empleo. En 1960, menos del 4 por ciento de la población mundial poseía uno. Veinte años después, el porcentaje era del 9. Hoy es del 12. Según los índices de crecimiento actuales, hacia 2020 puede que haya un 15 por ciento de los habitantes del planeta con vehículo propio. Puesto que la población actual es de unos seis mil millones y la prevista para 2020 de casi 7500 millones, el número total de vehículos pasaría de 700 millones a más de 1100 millones. Se debería esta expansión al crecimiento de la clase media en el mundo en vías de desarrollo, con el correspondiente aumento de la renta per cápita. Un mayor nivel de renta guarda una relación casi directa con la posesión de automóviles.

Las tres cuartas partes del parque de automóviles mundial se concentran hoy en Estados Unidos, Europa y Japón. Cabe, sin embargo, esperar que más del 60 por ciento del aumento en las ventas de nuevos vehículos durante los próximos 10 años se produzca en ocho mercados emergentes: China, Brasil, India, Corea, Rusia, México, Polonia y Tailandia. El reto consiste en crear vehículos atractivos, asequibles y rentables que sean seguros, tengan un buen rendimiento y no degraden el medio.

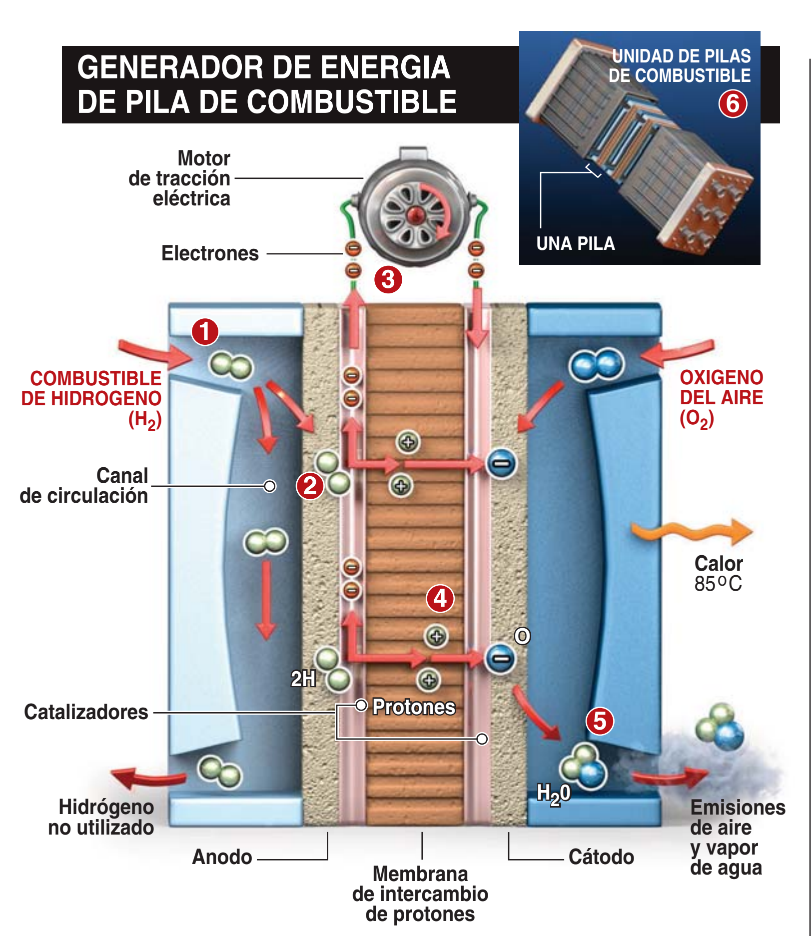
Nueva concepción de la propulsión automotriz

Para descubrir dónde se esconde la capacidad revolucionaria de la técnica del hidrógeno, consideremos el funcionamiento de un vehículo con pilas de

combustible. En esencia, se trata de un vehículo de tracción eléctrica; la diferencia estriba en que el motor obtiene la potencia de una unidad de pilas de combustible y no de una batería electroquímica. Se genera la electricidad mediante la extracción de los electrones del hidrógeno que circula a través de una membrana de las pilas; la corriente resultante impulsa motores eléctricos, que ponen a girar las ruedas del coche. Los protones del hidrógeno se combinan luego con oxígeno y con los electrones que regresan; se forma agua. Si el hidrógeno utilizado es puro, las emisiones del vehículo con pilas de combustible no contaminarán.

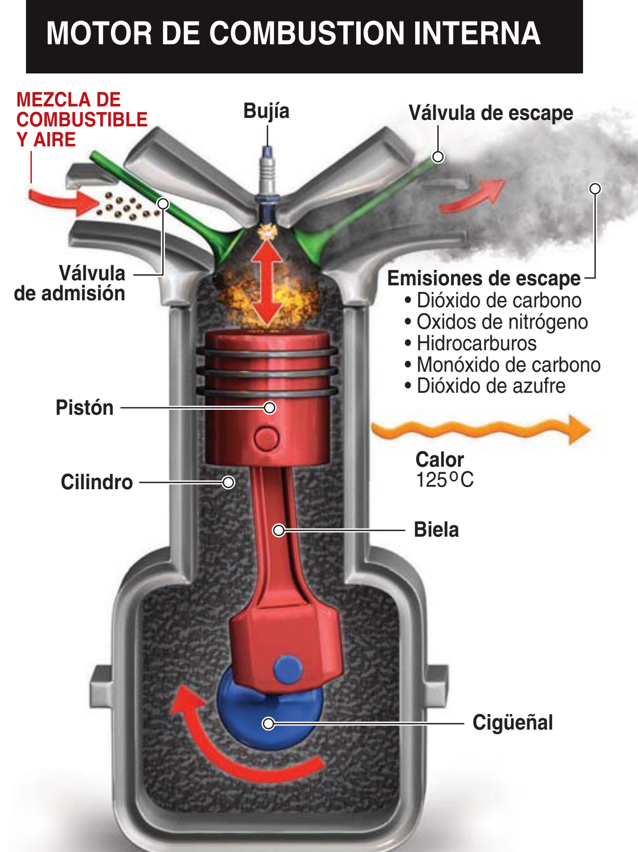
Ciertamente se consume energía para extraer el hidrógeno de otras sustancias, se haga por medio del craqueo catalítico de moléculas de hidrocarburos o por medio de la electrólisis del agua. Pero el alto rendimiento de la pila de combustible compensa con creces la energía que requieren tales procesos, como explicaremos más tarde. Por supuesto, esa energía tiene que venir de alguna parte. Algunas fuentes generadoras, como las plantas de gas natural y las centrales térmicas de carbón y petróleo, emiten dióxido de carbono y otros gases de invernadero, pero no sucede así con otras, entre ellas las nucleares. Lo ideal sería producir electricidad a partir de fuentes de energía renovables (hidroeléctricas, solares, eólicas, geotérmicas, la biomasa).

La adopción del hidrógeno como combustible de automoción podría iniciar la transición desde la dependencia total del petróleo hacia la utilización combinada de diversos tipos de combustible. El 98 por ciento de la energía motriz de los automóviles se obtiene hoy del petróleo. De ahí que dos terceras partes del crudo importado por EE.UU. se consuma en el transporte. La búsqueda de fuentes de energía que complementen a los combustibles fósiles podrá reducir la dependencia del petróleo extranjero y fomentar el desarrollo de recursos energéticos locales, menos



RENDIMIENTO DE HASTA EL 55%

ELECTROQUIMICA FRENTE A COMBUSTION: La pila de combustible con membrana de intercambio de protones comprende dos delgados electrodos porosos, ánodo y cátodo, separados por un electrólito de membrana polimérica que sólo deja pasar protones. Los catalizadores revisten una de las caras de cada electrodo. Una vez entra el hidrógeno (*1*), el catalizador del ánodo lo descompone en electrones y protones (*2*). Los electrones salen al exterior para mover un motor de tracción eléctrica (*3*), mientras que los protones emigran al cátodo a través de la membrana (*4*). Su catalizador combina los protones con los electrones que regresan y el oxígeno del aire para formar agua (*5*). Las pilas pueden acumularse para suministrar tensiones más altas (*6*).



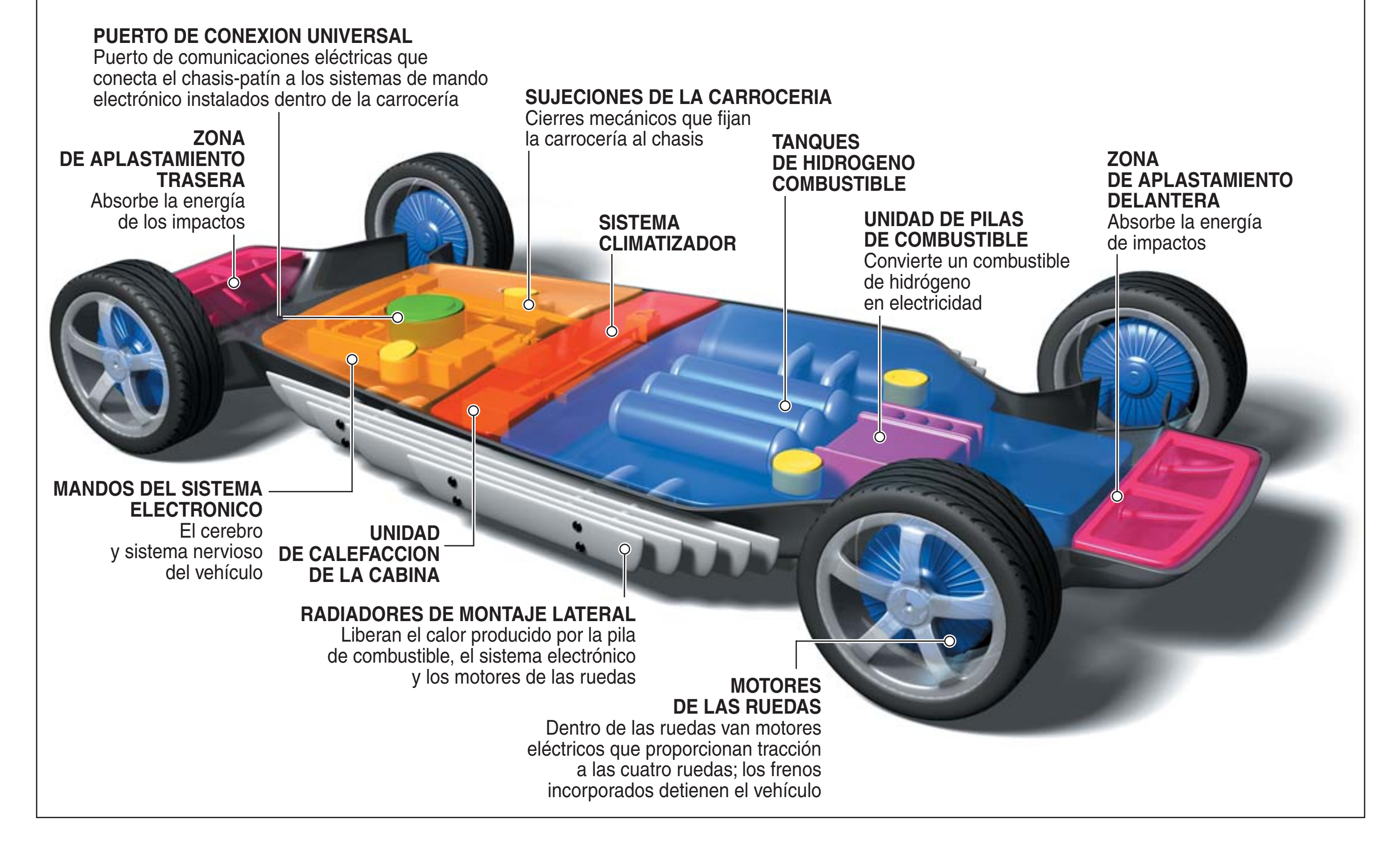
RENDIMIENTO DE HASTA EL 30%

LA MAYORIA DE LOS AUTOMOVILES utilizan motores de explosión de cuatro tiempos. El pistón, que se desplaza hacia arriba y abajo al girar el cigüeñal, parte del extremo superior del cilindro. La válvula de admisión se abre y el pistón cae, dejando que entre en el cilindro la mezcla de combustible y aire. El pistón vuelve a subir y en su ascenso comprime la gasolina y el aire. Salta la chispa en la bujía, encendiendo las minúsculas gotas de combustible, lo que hace explotar la carga comprimida y lanza hacia abajo el pistón. La válvula de escape se abre, permitiendo que los productos de la combustión salgan del cilindro.

JOE ZEFF

CHASIS "PATIN" DEL CONCEPTO AUTOnomía

GENERAL MOTORS ha desarrollado un vehículo movido por pilas de hidrógeno. Se le conoce por AUTOnomía. El elemento clave es un chasis plano, que recuerda a un monopatín, donde van embutidos los sistemas funcionales del automóvil. Contando además con mandos electrónicos de reducido tamaño para la dirección, el frenado y la aceleración, concede una libertad mucho mayor a la configuración de las carrocerías. Ya no habrá un voluminoso compartimento del motor, ni estorbarán el volante ordinario o la joroba que atraviesa la cabina. Este nuevo sistema permite que los usuarios puedan acoplar a un chasis ya usado nuevas carrocerías personalizadas; podremos transformar un utilitario en una furgoneta o en un coche de lujo.



agresivos contra el entorno. Habría una competencia mayor, que influiría en el establecimiento de los precios y a largo plazo disminuiría y estabilizaría los costes de los combustibles y la energía.

Renovación del diseño del vehículo

Otra de las claves de un diseño realmente revolucionario consiste en unir a la propulsión por pila de combustible la sustitución de los anteriores sistemas de dirección, aceleración o frenado, mecánicos, por unidades electrónicas de control. Así se libera espacio; los dispositivos electrónicos ocupan menos lugar. Programas informáticos rigen las prestaciones de esos sistemas. Además, al no existir un tren motriz clásico que limite las estructuras o estilos posibles, los fabricantes dispondrán de libertad para crear diseños muy dispares que satisfagan las necesidades peculiares de los clientes.

La sustitución de los motores de combustión tradicionales por los de pilas de combustible permite utilizar un chasis plano; se dispone así de mucha más libertad para crear carrocerías singulares. De modo análogo, la conducción electrónica permite mayor imaginación en el diseño del espacio interior, ya que los mandos de la conducción pueden alterarse radicalmente y ser accionados desde diferentes asientos del vehículo. Consciente de estas posibilidades, General Motors introdujo a principios de este año un concepto nuevo de automóvil, al que ha denominado AUTOnomía. En el Salón del Automóvil de París, a finales de septiembre, presentó un prototipo operativo, el Hy-wire (o coche de hidrógeno con conducción electrónica).

El concepto AUTOnomía y el prototipo Hy-wire se desarrollan de abajo arriba: el elemento de partida es un chasis delgado, semejante a un monopatín, que contiene la pila de combustible, el motor eléctrico, los tanques donde se almacena el hidrógeno, los mandos electrónicos y los radiadores de calor, así como los sistemas de frenado y dirección. No hay motor de combustión, ni transmisión, ni tren motriz, ni ejes, ni acoplamientos mecánicos.

En un vehículo AUTOnomía plenamente desarrollado, la técnica de conducción electrónica sólo exi-

JOE ZEFF

girá una sencilla conexión eléctrica, más un conjunto de conexiones mecánicas que unan el chasis a la carrocería. La carrocería podrá acoplarse al chasis de modo bastante similar a como un ordenador portátil se conecta a una base de expansión. El puerto eléctrico único ofrece una manera rápida y directa de unir al chasis todos los sistemas del espacio interior —mandos, sistemas eléctricos y calefacción—. La separación de chasis y carrocería facilita que ésta sea ligera, poco complicada y sustituible. En principio, el vendedor, o el mismo propietario, no tendría más que "enchufar" el correspondiente módulo de carrocería para que el vehículo fuese un coche de lujo hoy, un turismo familiar la semana que viene o una furgoneta dentro de un año.

También de manera análoga a un ordenador, los sistemas del vehículo se actualizarían por medios informáticos. El personal de mantenimiento podría descargar los programas idóneos para mejorar las prestaciones del vehículo o conseguir características que se acomoden mejor a una marca, un estilo de carrocería o las preferencias del cliente.

Con los mandos electrónicos no se necesitan volante, ni palanca de cambio ni pedales. El prototipo Hy-wire de General Motors va equipado con un mando de dirección X-Drive, que se inclina a un lado o al otro del vehículo para adaptarlo a la conducción por la derecha o por la izquierda. El mando X-Drive recuerda en su funcionamiento los puños de una motocicleta: girando, se acelera; apretando, se frena. Para conducir hay que realizar movimientos de rotación similares a los del volante actual. El conductor tiene la opción de frenar y de acelerar con la mano derecha o con la izquierda, con prioridad para el frenado en caso de superposición de señales. Para arrancar el vehículo basta oprimir un pulsador y seleccionar después una entre tres posiciones: punto muerto, marcha adelante y marcha atrás.

El X-Drive suprime, además, el salpicadero y la columna de dirección habituales, con lo que se despeja el interior del vehículo y pueden ubicarse de modo muy distinto asientos y espacios de carga. Al no haber compartimento del motor, el conductor y los pasajeros gozan de mejor visibilidad y les queda mucho más espacio para estirar las piernas.

Al rebajar la altura del centro de gravedad y suprimir el rígido bloque del motor delante de los pasajeros, el chasis-patín de AUTOnomía mejora las características de conducción, manejo y estabilidad más allá de lo que permite la arquitectura ordinaria de los vehículos.

Reorganización del sector de la automoción

El diseño simplificado de un vehículo avanzado de pilas de combustible, en la línea adelantada por AUTOnomía y el prototipo Hy-wire, podría repercutir en la fabricación de vehículos e incluso preparar el terreno para una completa remodelación del sector. La industria de automoción necesita de grandes inversiones en capital y sus márgenes de beneficio son reducidos. Pese a una eficaz gestión de los costes de desarrollo y fabricación por parte de las empresas, los excesos de producción mundiales fuerzan a la baja los precios de los vehículos. Al mismo tiempo, las normas legales obligan a añadir nuevo equipamiento a coches y camiones, lo que incrementa los costes. La suma de ambos factores, descenso de precios y elevación de costes, amenaza los márgenes de beneficio.



GENERAL MOTORS

AUTOnomía podría, sin embargo, cambiar a fondo el actual enfoque del negocio. Es muy probable que bajasen los costes de desarrollo de los vehículos; gracias a la posibilidad de producir módulos por separado, sería más fácil y barato acometer modificaciones en el diseño de chasis y carrocerías. Igual que hoy sucede con los derivados de plataforma de camión, cabría diseñar un mismo chasis para diversos estilos de carrocería; no sería difícil diferenciarlos por su terminación frontal, estructura interior y acomodación al chasis. Con sólo tres tipos de chasis —pequeño, mediano y grande—, los volúmenes de producción podrían ser muy superiores a los actuales; de ese modo se conseguirían mayores economías de escala.

La drástica reducción de la variedad de componentes y piezas del vehículo aportará un nuevo recorte de los costes. La unidad de pilas de combustible, por ejemplo, se ensambla a partir de una serie de pilas sueltas idénticas: cada una consta de un par de láminas planas que sirven de cátodo y de ánodo, separadas por una membrana polimérica que actúa de electrólito. Dependiendo de la potencia que necesite un determinado vehículo (u otro dispositivo, tal un generador eléctrico fijo), se aumenta o disminuye el número de pilas en el rimero.

Aunque la técnica de las pilas de combustible para automoción todavía dista mucho de ser económica (un prototipo construido a mano vale miles de euros por kilowatt), los costes han iniciado un espectacular descenso. Por botón de muestra, en los últimos cinco años se ha multiplicado por diez la densidad de potencia de las pilas de combustible a la par que su coste se reducía a la décima parte. Si bien es cierto que las células requieren actualmente metales preciosos como catalizadores y costosas membranas de polímeros, se está progresando en la reducción al mínimo del uso de catalizadores y en abaratar los materiales de las membranas.

Los autores

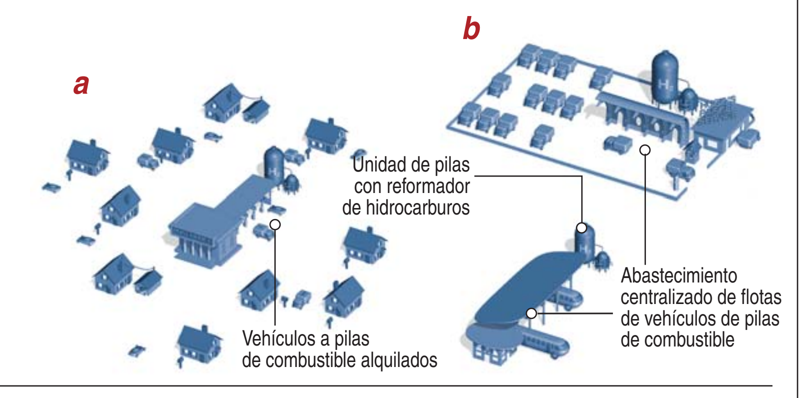
LAWRENCE D. BURNS, J. BYRON McCORMICK y CHRISTOPHER E. BORRONI-BIRD desempeñan una importante función en el desarrollo de pilas de combustible en General Motors. Burns es vicepresidente de Investigación, Desarrollo y Planificación; McCormick, director ejecutivo de Actividades de Pilas de Combustible; Borroni-Bird, director del programa AUTOnomía.

ETAPAS HACIA UNA SOCIEDAD DEL HIDROGENO

EN UNOS AÑOS

a Se prueba un pequeño número de prototipos alquilándolos a personas que residan cerca de una estación suministradora de hidrógeno.

b Unas estaciones de hidrógeno de ubicación céntrica empiezan a abastecer flotas de vehículos industriales y de transporte que vuelven al garaje a diario, como autobuses, furgonetas y coches de reparto.

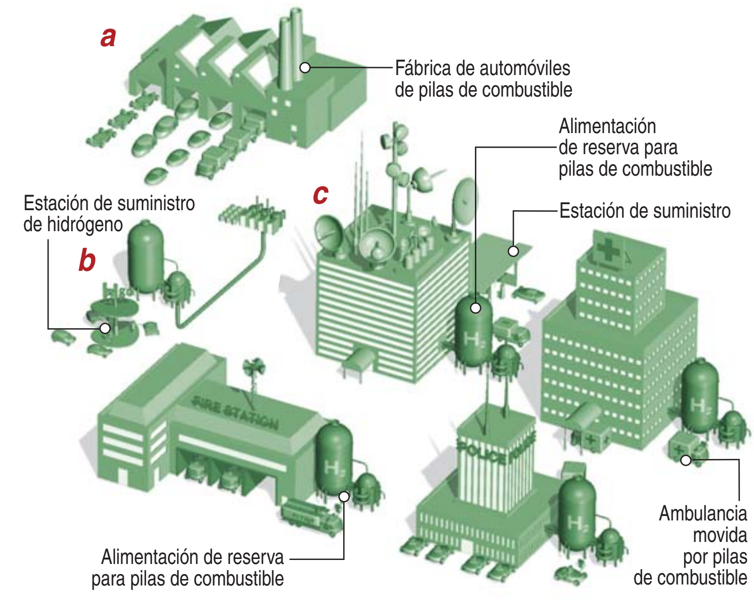


A DIEZ AÑOS VISTA

a Se fabrican "chasis-patines" propulsados por pilas de combustible y unos pocos tipos diferentes de carrocería "enchufable".

b Se instalan estaciones de suministro de hidrógeno con reformadores de gas natural (unidades químicas de craqueo) *in-situ*, que abastecerán a los primeros vehículos fabricados.

c Se instalan generadores fijos, que convierten el gas natural en hidrógeno y alimentan las pilas de combustible, en empresas que requieren potencia extra de alta fiabilidad para comunicaciones de datos, fabricación continua o atenciones médicas. Ambulancias y vehículos de urgencias se abastecen en la unidad del propio hospital.



A PARTIR DE DIEZ AÑOS

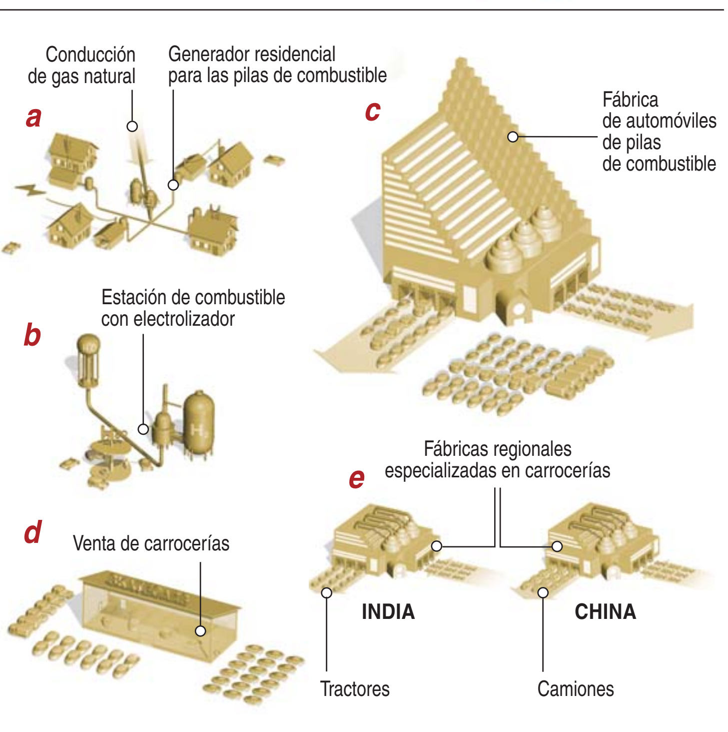
a Unas unidades fijas de pilas de combustible y craqueo se emplazan junto a empresas de otros tipos y, en último término, en viviendas. Desde ahí se vende la potencia sobrante a la red eléctrica (sistema de generación distribuida). Estas instalaciones suministran hidrógeno a los empleados.

b Entran en servicio más estaciones de hidrógeno provistas de electrolizadores.

c Enormes plantas de montaje producen chasis-patines para pilas de combustible en tres tamaños (compacto, mediano, grande).

d Los concesionarios venden nuevas carrocerías de estilos diversos para chasis ya usados.

e Otras factorías de diferentes regiones construyen carrocerías variadas para sus mercados locales (por ejemplo, tractores y camiones para India y China).



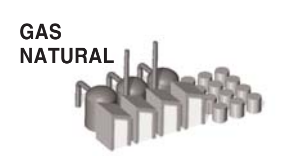
FUENTES DE ENERGIA

A los actuales generadores de combustibles fósiles, nucleares e hidroeléctricos se añadirán en progresión creciente nuevas plantas de energías renovables y menos contaminantes.

















SLIM FILMS

El concepto AUTOnomía permite, además, desvincular la del chasis de la fabricación de la carrocería. La fabricación y distribución de los chasis podrían encomendarse a un fabricante mundial (sería ideal, considerada su forma plana), y en cada país habría firmas que construirían las carrocerías y montarían los vehículos completos. Fabricado a tan gran escala, el chasis saldría muy económico.

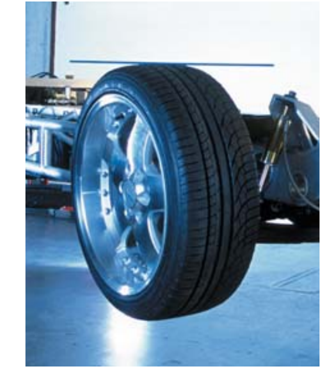
En el mercado de la gama alta, un acuerdo de este género podría dar origen al lanzamiento de nuevos chasis cada tres o cuatro años —cuando las mejoras introducidas en los programas informáticos no ofrecieran ya las prestaciones deseadas—, pero los clientes tendrían la opción de comprar un módulo de carrocería nuevo todos los años, o aún más a menudo si lo alquilaran. Por añadidura, si los equipos informáticos del chasis estuvieran diseñados adecuadamente, resultaría práctico actualizarlos; lo mismo podría hacerse con los programas que ejecuten. También, quienes deseasen conservar la carrocería de su vehículo y desearan un chasis con un mejor rendimiento podrían comprar sólo éste. En segmentos del mercado menos florecientes, el chasis comprendería equipos duraderos y admitiría períodos de financiación más largos, tal vez de decenas de años.

Almacenamiento del hidrógeno

No vamos a decir que la ingeniería de los vehículos de pila de combustible haya superado todos los obstáculos de orden práctico. Todavía quedan por salvar muchas barreras antes de que compitan en prestaciones con los automóviles ordinarios. Una de las mayores dificultades estriba en conseguir una técnica eficaz y segura de almacenar hidrógeno a bordo en cantidad suficiente para una autonomía de 500 kilómetros. El sistema de almacenamiento sólo será aceptable si aguanta al menos un cuarto de millón de kilómetros recorridos. Ha de funcionar a temperaturas de –40 a +45 grados centígrados. El avituallamiento de combustible tiene que ser sencillo y completarse en menos de cinco minutos. Existen diversos sistemas para almacenar hidrógeno, sea en estado sólido, en forma líquida o como gas comprimido. Todos son prometedores, pero ninguno se halla libre de problemas.

Lo más probable es que se utilicen primero tanques de gas comprimido, aunque las altas presiones siguen percibiéndose como un riesgo. Estos dispositivos transportan hoy el hidrógeno a presiones de 350 bar, pero se quiere llegar a los 700 bar para ampliar la autonomía del vehículo. Por razones de seguridad, el depósito debe tener una resistencia a los impactos que, como mínimo, sea el doble de la presión del combustible. Los recipientes se hacen ahora de materiales muy caros, como la fibra de carbono, o muy pesados. Además son bastante grandes; cuesta encajarlos en la estructura.

El hidrógeno puede también almacenarse en estado líquido, pero se necesita una notable cantidad de energía para enfriarlo a las bajísimas temperaturas requeridas (–253 grados centígrados). Además, cada día se “evapora” del 3 al 4 por ciento. Aunque el vehículo utilizase la mayor parte de ese hidrógeno evaporado durante la marcha, se tendría un problema en cuanto un coche estuviese aparcado varios días.



A más largo plazo puede pensarse en transportar el hidrógeno por métodos de estado sólido. Una solución atractiva consistiría en utilizar un hidruro metálico: el hidrógeno quedaría retenido en los intersticios de un polvo comprimido de aleación metálica, a manera de agua absorbida en una esponja. Esta técnica ofrece muchos aspectos positivos; la construcción es sencilla, la seguridad alta y la capacidad de almacenamiento prometedora. Sin embargo, para extraer el hidrógeno del hidruro metálico se necesitan temperaturas de 150 a 300 grados, que sería preciso rebajar hasta unos 80 grados a fin de evitar el consiguiente gasto energético. Aunque se halle todavía en sus principios, el almacenamiento en estado sólido despierta grandes esperanzas.

Rehacer la infraestructura

Por importantes que fueran los cambios para el sector de la automoción, parecerían poca cosa comparados con la repercusión que los automóviles del tipo AUTOnomía tendrían en el sistema energético mundial. Desde nuestra perspectiva actual, las pilas de combustible y la infraestructura de abastecimiento de hidrógeno describen un círculo vicioso. No podemos producir en gran número vehículos propulsados por pilas de combustible sin disponer de una adecuada infraestructura de suministro de hidrógeno, pero tampoco podremos crear esa infraestructura a no ser que haya un número considerable de tales vehículos circulando por las carreteras. Dado que la comercialización de coches y camiones movidos por pilas de combustible exige la creación previa de una red nacional de generación y distribución de hidrógeno, que se prevé muy costosa, resulta esencial contar con el firme apoyo de los dirigentes locales y nacionales, tanto del sector público como del privado. Hay que abordar asuntos clave, como la financiación por medio de subvenciones, los incentivos para el desarrollo de estaciones donde se reposte combustible, la creación de normas uniformes y una educación general al respecto. Un paso en la dirección correcta ha sido la iniciativa *FreedomCAR*, anunciada a principios de este año por el Departamento de la Energía de EE.UU.: se trata de un consorcio público-privado destinado a promover el desarrollo de las pilas de combustible y del hidrógeno como propulsores primarios de coches y camiones. Se necesitará el apoyo del Gobierno para la investigación y las demostraciones piloto que habrán de comprobar la viabilidad de la infraestructura.

Por descontado, la industria también debe asumir su papel en la difícil transición hacia la economía del hidrógeno. General Motors está ideando una estrategia dirigida a establecer puentes que permitan avanzar. Nuestro empeño se orienta ahora a comercializar pro-

ductos provisionales para pilas de combustible basadas en el hidrógeno; generarán ingresos que ayudarán a compensar las enormes inversiones, los cientos de millones de euros, que la empresa dedica a esta técnica, al tiempo que se va adquiriendo experiencia en el funcionamiento real.

Es muy probable que, antes de que se generalicen los vehículos impulsados por pilas de combustible, se vendan generadores con este tipo de pilas a empresas y finalmente a viviendas. Se trata de aplicaciones mucho menos complejas que los automóviles, cuyas prestaciones están sujetas a requisitos muy exigentes. General Motors ha desarrollado prototipos de generadores fijos basados en pilas de combustible que funcionan con hidrógeno extraído de combustibles fósiles.

En los próximos años, General Motors presentará una gama de generadores fijos basados en pilas de combustible. Se encauzará hacia un segmento especial del mercado energético: el de los clientes preferentes que tienen el suministro garantizado. Mueve este sector 10.000 millones de euros al año. Entre los usuarios que no pueden quedarse sin electricidad hay centros de datos digitales, hospitales, fábricas de proceso industrial continuo, operadoras de telecomunicación. Los nuevos generadores reducirían costes merced a la posibilidad que ofrecen de cortar el consumo de energía eléctrica durante las crestas de consumo, además de obtener ganancias de la venta de potencia sobrante a la red eléctrica. Uno de los productos iniciales será una unidad de 75 kilowatt equipada con un reformador de hidrocarburos que extrae hidrógeno del gas natural, metano o gasolina para utilizarlo en la pila de combustible. Construir estas fuentes de energía estacionarias no requiere innovaciones técnicas espectaculares. Una vez en servicio, tales sistemas descentralizados servirían también para avituallar a los vehículos de hidrógeno.

Cuando se cuente ya con sistemas fiables y seguros de almacenar hidrógeno, el procesamiento del combustible en instalaciones externas al vehículo se convertirá en un modo viable de generar el hidrógeno requerido por la automoción. Una gran ventaja de este procedimiento procede de la infraestructura necesaria para realizarlo, que ya existe en su mayor parte. La actual red de distribución de combustibles extraídos del petróleo podría adaptarse a ese fin mediante la instalación de reformadores de combustible o electrolizadores en las gasolineras. Los operadores locales podrían generar hidrógeno en el acto y servirlo a sus clientes. Así no habría necesidad de construir nuevas conducciones de larga distancia ni desmantelar la infraestructura actual de servicio al automóvil. En los comienzos de la transición de petróleo a hidrógeno, muy bien podría ser éste el camino óptimo.

Un sistema todavía más radical consistiría en repostar en casa o en la oficina, valiéndose de la red de distribución que actualmente suministra gas a viviendas y empresas. En muchas zonas las conducciones de gas natural son tan corrientes como las gasolineras; en ellas, esta infraestructura sería un conducto ideal para el hidrógeno. El gas natural podría convertirse en hidrógeno y luego almacenarse a bordo del vehículo. Otra solución sería producir el hidrógeno con electricidad tomada de la red. La compra de energía eléctrica durante las horas de bajo consumo, como las que el coche pasa en su aparcamiento nocturno, podría ser un medio asequible para repostar combustible en ciertos emplazamientos.

A medida que se vayan refinando los sistemas de generación de energía, el automóvil pasará a desempeñar un papel destacado en la transformación de la

EL INTERIOR DEL MODELO HY-WIRE



EL DISEÑO FLEXIBLE y las preferencias del usuario son las claves de la idea de General Motors de alojar todos los sistemas operativos en el chasis. Los diseñadores cuentan así con toda libertad para ensayar configuraciones de la cabina de pasajeros sin tener que sujetarse a límites tradicionales, como los impuestos por el salpicadero o la prominente división central. Las carrocerías son intercambiables: a un mismo chasis se le pueden acoplar carrocerías muy distintas.



GENERAL MOTORS

red global de energía eléctrica. Llegado cierto momento, los vehículos podrían convertirse en una nueva fuente generadora, que suministraría electricidad a viviendas y centros de trabajo. La mayoría de los vehículos se mantienen ociosos el 90 por ciento del tiempo; cabe imaginar que la potencia disponible crecería exponencialmente si la red eléctrica se viese reforzada por la capacidad generadora de coches y camiones aparcados. Téngase en cuenta que bastaría con que uno de cada 25 vehículos que circulan en California fuese de pilas de combustible para que su capacidad generadora combinada superase a la de la red eléctrica de ese estado.

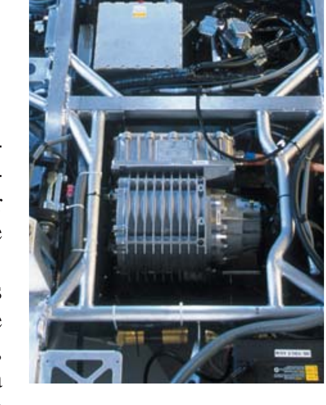
Existen múltiples opciones para crear una red de distribución de hidrógeno. Aquí se han descrito situaciones verosímiles, pero uno de los factores más importantes para evaluar la infraestructura final será su coste. Empresas del sector energético de todo el mundo están analizando los aspectos económicos del hidrógeno. En reciente declaración ante el Subcomité de Energía de la Cámara de Representantes de los EE.UU., James P. Uihlein, de BP, sostuvo que podría generarse hidrógeno a partir de gas natural a un coste comparable al de los combustibles usuales. El coste por kilómetro recorrido, añadió, sería a la puerta de la refinería, gracias al excepcional rendimiento del motor de pila de hidrógeno, bastante menor que el de los combustibles ordinarios. El elevado precio actual del hidrógeno se debe, según Uihlein, a los gastos de transporte y reparto.

A vueltas con el hidrógeno

Dependiendo de la materia prima y de los métodos de producción y de distribución que se utilicen, el kilogramo de hidrógeno vale entre cuatro y seis veces lo que cuesta un galón (3,8 litros) de gasolina o gasóleo. (La energía contenida en un kilogramo de hidrógeno viene a ser la de un galón de gasolina o gasóleo.) Sin embargo, como es muy probable que el rendimiento de un vehículo de pilas de combustible optimizado sea más del doble del conseguido por el motor de combustión interna, con ese kilogramo de hidrógeno recorrerá una distancia doble. Por consiguiente, el hidrógeno empezaría a salir rentable si el kilogramo se pagara, al por menor, al doble que el galón de gasolina. Los perfeccionamientos técnicos en el almacenamiento, procesamiento y electrólisis del hidrógeno, unidos al incremento de la demanda, aproximarán su precio a los valores requeridos. Unos estudios recientes indican que con la técnica actual el precio sólo supera en un treinta por ciento el pretendido.

Aunque todavía nos encontramos en las primeras etapas de tanteo, creemos que la infraestructura se desarrollará con rapidez cuando sea necesario, pese a las enormes dificultades que ello implica. Así sucedió hace un siglo, cuando se comprobó la utilidad de la gasolina para los automóviles y en muy poco tiempo se creó una infraestructura adecuada. Siempre hay emprendedores dispuestos a aprovechar nuevas oportunidades. Se empiezan ya a desarrollar las técnicas necesarias para la producción y distribución del hidrógeno, pero la magnitud de semejante infraestructura es ingente y habrá que vencer considerables obstáculos de orden técnico.

GENERAL MOTORS



Mientras prosiguen los debates sobre el modo de crear la red de distribución, interesa destacar que hay ya instaladas infraestructuras de hidrógeno en varios lugares del globo, sobre todo a lo largo de la costa del golfo de México y alrededor de Rotterdam. Las industrias petroleras y químicas producen hidrógeno (se utiliza para la eliminación del azufre en el proceso de refinado del crudo). Significa ello que circula este gas por cientos de kilómetros de conducciones en diversos países. La infraestructura existente produce anualmente unos 540.000 millones de metros cúbicos de hidrógeno, a partir del gas natural sobre todo. En términos de energía, esto equivale a unos 140 millones de toneladas de petróleo por año; es decir, el 10 por ciento de la demanda actual del transporte. Aunque esta infraestructura se dedique a otros usos, el mero hecho de su existencia demuestra que se posee experiencia en la generación y transporte del hidrógeno.

Como cualquier innovación capaz de cambiar radicalmente las técnicas dominantes, la generalización de las pilas de combustible y la transición a una infraestructura energética basada en hidrógeno llevarán su tiempo. Aunque sea difícil formular una predicción ajustada, nuestro objetivo, dados el estado actual de la técnica y la situación real del sector, es poner en circulación vehículos de hidrógeno atractivos y asequibles a finales de esta década. Pronosticamos un notable aumento de su penetración entre 2010 y 2020, a medida que los fabricantes de automóviles vayan levantando los fundamentos necesarios para una producción a gran escala. Muchas de esas firmas han invertido ya cientos de millones de euros en investigar y desarrollar las pilas de combustible; desean obtener beneficios lo antes posible.

La renovación total del parque de vehículos requiere alrededor de veinte años. Habrá de transcurrir al menos ese período para recoger en su plenitud los beneficios ambientales y energéticos que proporcionarán los vehículos propulsados por pilas de hidrógeno. Pero el concepto AUTOnomía nos aproxima —y aclara— ese futuro. No se trata ya de un paso más de la evolución histórica del automóvil, sino del desarrollo de técnicas revolucionarias que van a reinventar el automóvil y el papel que desempeña en nuestro mundo.

Bibliografía complementaria

PREPARED STATEMENT OF JAMES P. UIHLEIN TO THE U.S. HOUSE OF REPRESENTATIVES COMMITTEE ON SCIENCE, SUBCOMMITTEE ON ENERGY. Field Hearing on Fuel Cells: The Key to Energy Independence? 24 de junio de 2002.



Evolución del color de la piel humana

El color de nuestra piel ha evolucionado en una suerte de fino compromiso entre la tendencia hacia la tonalidad oscura para evitar que la luz solar destruya un nutriente, el folato, y la tendencia hacia la tonalidad clara para promover la producción de vitamina D

Nina G. Jablonski y George Chaplin

Entre los primates, sólo los seres humanos tienen la piel desnuda y de distinto color. Geógrafos y antropólogos saben desde hace mucho que el tono de la epidermis no se distribuye al azar: los pueblos que la tienen más oscura suelen encontrarse cerca del ecuador; los que la tienen más clara, cerca de los polos. Durante años, ha prevalecido la teoría de que la evolución engendró los colores oscuros como protección contra el cáncer de piel. Pero una serie de descubrimientos nos ha llevado a formular un nuevo armazón evolutivo para las variaciones cromáticas de la piel humana. Datos epidemiológicos y fisiológicos recientes indican que la selección natural ha creado esa distribución mundial del color para regular los efectos de la radiación ultravioleta (UV) solar sobre ciertos nutrientes, fundamentales para el éxito reproductor.

Del hirsuto al lampiño

La evolución de la pigmentación de la piel está vinculada a la de la piel lampiña. Para comprender ambos procesos, necesitamos hojear las páginas pasadas de la historia humana. Los seres humanos han evolucionado como una línea independiente de primates desde hace al menos siete millones de años, cuando uno de nuestros ancestros inmediatos se separó de los parientes más cercanos, los chimpancés. Estos han cambiado menos que los seres humanos en el curso del tiempo; pueden darnos una idea de cómo debieron de ser en otro tiempo la anatomía y la fisiología humana. La piel del chimpancé es de color claro y está cubierta por pelo en la mayor parte de su cuerpo. Los sonrosados pies, manos y caras de los animales jóvenes se llenan de pecas o se oscurecen con la edad a causa de la exposición al sol. Los primeros humanos tenían con toda seguridad una piel clara cubierta con pelo. Probablemente ocurrió primero la pérdida del pelo y sólo después cambió el color de la piel. Pero, ¿cuándo perdimos el pelo que nos cubría el cuerpo?

Los esqueletos de protohumanos —como el muy conocido de Lucy, de hace unos 3,2 millones de años— nos dan una idea de la configuración y estilo de vida de nuestros antepasados. Parece que las actividades diarias de Lucy y de otros homínidos que vivieron hace más de tres millones de años eran semejantes a las de los primates que hoy habitan las sabanas de Africa. Es probable que dedicaran una buena parte del día a la búsqueda de alimentos en un radio de cinco a siete kilómetros, antes de retirarse a la seguridad de la floresta para dormir.

Hay, sin embargo, indicios de que hará unos 1,6 millones de años ese patrón de conducta había empezado a cambiar por completo. El esqueleto del Niño de Turkana —de la especie *Homo ergaster*— pertenece a un bípedo de extremidades inferiores largas que probablemente recorría grandes distancias. Estos seres humanos primitivos más activos se enfrentaban al problema de

IRAIDA ICAZA

permanecer frescos, de proteger su cerebro de un calentamiento excesivo. Peter Wheeler, de la Universidad John Moores de Liverpool, ha demostrado que lo conseguían gracias a un aumento del número de glándulas sudoríparas en la superficie del cuerpo y una reducción del pelo corporal. Una vez despojados de éste, a los miembros primitivos del género *Homo* se les planteaba una nueva dificultad: proteger su piel de los efectos dañinos de la luz solar, en especial de los rayos UV.

Protector solar incorporado

La piel de las zonas del cuerpo de los chimpancés que carecen de pelo contiene melanocitos, células que sintetizan un pigmento oscuro cuando están expuestas a la radiación UV. Al quedarse los seres humanos sin el pelo que les cubría la mayor parte del cuerpo, la capacidad de la piel de producir melanina adquirió una importancia nueva. La melanina es el protector solar natural: se trata de una macromolécula orgánica que cumple el doble propósito de filtrar física y químicamente los efectos nocivos de las radiaciones UV; absorbe los rayos UV, haciéndoles perder energía, y neutraliza los productos químicos —los radicales libres— que se forman en la piel después de la acción lesiva de la radiación UV.

Los antropólogos y los biólogos han razonado por lo general que en la piel de los pueblos tropicales surgieron concentraciones elevadas de melanina porque protegían contra el cáncer de piel. James E. Cleaver, de la Universidad de California en San Francisco, por ejemplo, ha demostrado que las personas que padecen xeroderma pigmentoso, enfermedad en que la exposición al sol destruye los melanocitos, contraen con una mayor frecuencia carcinomas de células basales y escamosas, que habitualmente se tratan con facilidad. Los melanomas malignos resultan con mayor frecuencia letales; eso sí, son raros (representan el 4 por ciento de los diagnósticos de cánceres de piel) y tienden a presentarse en personas con piel clara. Pero todos los tipos de cánceres de piel aparecen de ordinario en edades avanzadas de la vida, en la mayoría de los casos pasada la primera parte de la edad fértil. Por tanto, la presión evolutiva que ejerciesen no pudo ser tan intensa como para que la mera protección de la piel explique el color oscuro de ese tejido. ¿Qué papel podría desempeñar la melanina en la evolución humana?

Resumen/*Evolución del color de la piel*

- Después de perder el pelo —una adaptación para mantener refrescado el organismo—, los homínidos adquirieron una piel pigmentada. Se pensó en un principio que esa pigmentación se generó para protegerles contra la radiación ultravioleta (UV) causante del cáncer de piel.
- Los cánceres de piel tienden, sin embargo, a surgir pasada la edad de reproducción. Una teoría alternativa propone que la evolución podría haber conducido a la piel oscura como protección contra la destrucción de folato, nutriente esencial para la fecundidad y el desarrollo fetal.
- Una piel demasiado oscura bloquea la entrada de la luz solar necesaria para la catálisis de la producción de vitamina D, crucial para los huesos de la madre y del feto. Por consiguiente, el ser humano ha evolucionado en el sentido de desarrollar una piel tan clara como para generar la vitamina D que se necesita y, sin embargo, tan oscura como para proteger sus depósitos de folato.
- Fruto de las recientes migraciones humanas, muchos viven ahora en regiones en que reciben más radiación UV, o menos, de la adecuada para el color de su piel.

La conexión con el folato

En 1991 una de nosotros (Jablonski) dio con un artículo científico de una importancia, como se vería después, capital; lo habían publicado en 1978 Richard F. Branda y John W. Eaton. Demostraban allí que las personas de piel clara a las que se había expuesto a una intensa luz solar simulada presentaban en la sangre niveles anormalmente bajos de folato, una vitamina B esencial. Habían observado también que, sometiendo el suero sanguíneo humano a las mismas condiciones, se producía un descenso de hasta un 50 por ciento del contenido de folato en el plazo de una hora.

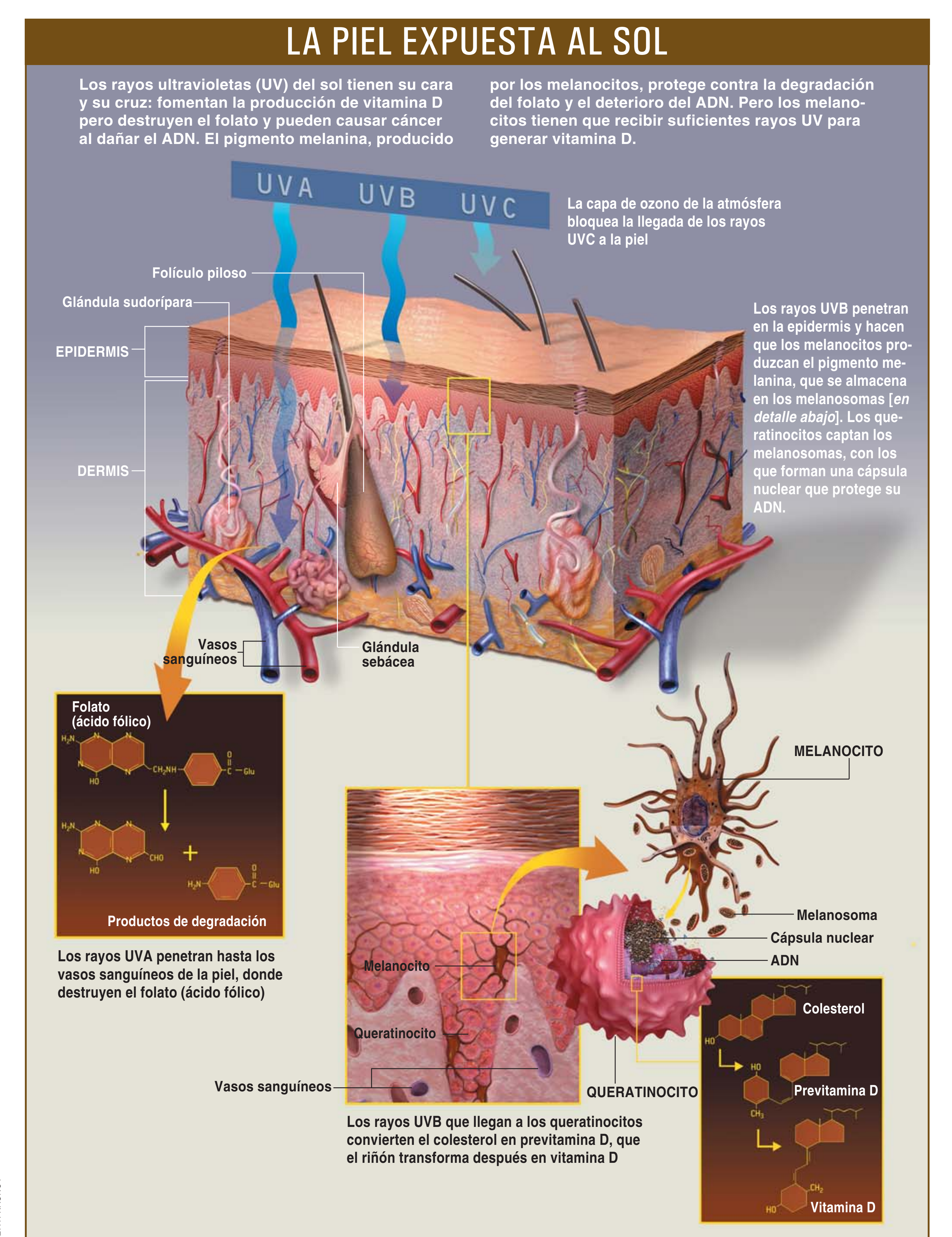
El significado de estos hallazgos para la reproducción —y por tanto para la evolución— se puso de manifiesto cuando tuvimos noticia de las investigaciones de unos colegas de la Universidad de Australia Occidental sobre una clase importante de defectos congénitos. Fiona J. Stanley y Carol Bower habían establecido hacia finales de los años ochenta que la deficiencia de folato en las mujeres embarazadas guardaba relación con un riesgo elevado de que el feto sufra defectos del tubo neural, como la espina bífida, patología en la que los arcos de las vértebras no se cierran alrededor de la médula espinal. Muchos grupos de investigadores de todo el mundo han confirmado luego esta correlación; se ha extendido mucho el empeño en complementar los alimentos con folato y en educar a las mujeres sobre la importancia de este nutriente.

Poco después descubrimos nosotros el interés del folato no sólo para prevenir los defectos del tubo neural, sino también en otros procesos. Imprescindible en la síntesis del ADN durante la división celular, cualquier proceso que implique una proliferación celular rápida, como la espermatogénesis, requiere folato. Las ratas y ratones macho con una deficiencia de folato inducida químicamente padecen alteraciones en la espermatogénesis y son infértiles. Aunque no se han hecho estudios comparables en el hombre, Wai Yee Wong y sus colaboradores de la facultad de medicina de la Universidad de Nimega, han señalado que el tratamiento con ácido fólico eleva el número de espermios en varones con problemas de fertilidad.

Estas observaciones nos llevaron a plantear la hipótesis de que la piel evolucionó hasta volverse oscura para proteger los depósitos de folato almacenados en el organismo. Nuestra idea encontró el respaldo de un informe publicado por Pablo Lapunzina en 1996. Vio que

LA PIEL EXPUESTA AL SOL

Los rayos ultravioletas (UV) del sol tienen su cara y su cruz: fomentan la producción de vitamina D pero destruyen el folato y pueden causar cáncer al dañar el ADN. El pigmento melanina, producido por los melanocitos, protege contra la degradación del folato y el deterioro del ADN. Pero los melanocitos tienen que recibir suficientes rayos UV para generar vitamina D.



KEITH KASNOT

tres mujeres jóvenes, por lo demás en buen estado de salud, habían dado a luz niños con defectos del tubo neural tras haber tomado en las primeras semanas del embarazo el sol para broncearse. Nuestros datos acerca de la destrucción del folato por la radiación UV se suman a lo que ya se sabía sobre los efectos nocivos (producción de cáncer de piel) de la irradiación UV en el ADN.

La transformación de la piel humana

Los primeros individuos de *Homo sapiens*, es decir, los primeros seres humanos modernos, surgieron en Africa hará entre 120.000 y 100.000 años. Poseían una piel fuertemente pigmentada, adaptada a la intensa radiación UV y las temperaturas elevadas de cerca del ecuador. A medida que el hombre moderno empieza a aventurarse fuera de los trópicos, sin embargo, va encontrando ambientes donde recibe una irradiación UV mucho menor durante el año. En esas nuevas condiciones, la protección natural excesiva contra el sol probablemente fue perjudicial. La piel oscura contiene tanta melanina, que muy poca radiación UV, y apenas radiación UVB, de menor longitud de onda, puede penetrar en la piel. Aunque la mayor parte de los efectos de la UVB son nocivos, los rayos cumplen una función indispensable: iniciar la formación de la vitamina D en la piel. Las personas de piel oscura que viven en los trópicos reciben de ordinario suficiente radiación UV durante el año para que la UVB pene-



tre en la piel y produzca vitamina D. No acontece así fuera de los trópicos. La solución, con el transcurrir del tiempo evolutivo, para quienes emigraban hacia las latitudes del norte consistió en perder la pigmentación de la piel.

W. Farnsworth Loomis, de la Universidad Brandeis, ahondaba en 1967 en la conexión entre la evolución de la piel ligeramente pigmentada y la síntesis de la vitamina D. Estableció la importancia de la vitamina D en la reproducción, por su papel en la absorción de calcio en el intestino, que a su vez posibilita el desarrollo normal del esqueleto y el mantenimiento del sistema inmunitario en buen estado. Las investigaciones que ha realizado Michael Holick, de la facultad de medicina de la Universidad de Boston, en los últimos 20 años han cimentado más aún el significado de la vitamina D en el desarrollo y la inmunidad. Su equipo ha demostrado también que no toda la luz solar contiene suficiente UVB para estimular la síntesis de vitamina D. En Boston, por ejemplo, situada alrededor de los 42 grados de latitud norte, las células de la piel humana comienzan a producir vitamina D mediado marzo. Durante el invierno no hay suficiente UVB para realizar esa función. Comprendimos que ese dato era esencial para dilucidar la cuestión del color de la piel.

En el curso de nuestra investigación, buscamos en vano, a principios de los años noventa, datos sobre los niveles reales de radiación UV en la superficie de la Tierra. Nuestra recompensa llegó en 1996, cuando nos pusimos en contacto con Elizabeth Weatherhead, del Instituto Cooperativo para la Investigación de las Ciencias Ambientales, de la Universidad de Colorado en Boulder. Puso a nuestra disposición una base de datos con las medidas de la radiación UV en la superficie tomadas por un satélite de la NASA, el Espectrofotómetro Cartográfico Total del Ozono, entre 1978 y 1993. Pudimos entonces confeccionar un modelo de la distribución de la radiación UV en la superficie de la Tierra y relacionar los datos del satélite con la cantidad de UVB necesaria para producir vitamina D.

Vimos que la superficie del planeta puede dividirse en tres zonas por lo que se refiere a la vitamina D: una comprende los trópicos, otra las regiones subtropicales y templadas, y la última, las regiones circumpolares a partir de unos 45 grados de latitud. En la primera, la dosis de UVB basta para que los seres humanos sinteticen vitamina D todo el año. En la segunda, hay al menos un mes del año en que es insuficiente. En la tercera, no llega, en promedio, a promover la síntesis de vitamina D a lo largo del año. Esta distribución podría explicar por qué la piel de los pueblos indígenas de los trópicos es oscura, por qué más clara, y con la posibilidad de broncearse, la de quienes viven en las regiones subtropicales y templadas, y por qué la de quienes proceden de cerca de los polos tiende a ser muy clara y se quema con facilidad.

Uno de los apartados más interesantes de esta investigación fue el examen de grupos que no acababan de encajar en el color de la piel anticipado. Tenemos un ejemplo en el pueblo inuit de Alaska y norte de Canadá. Los inuit presentan un color de la piel algo más oscuro de lo que cabría predecir, dados los niveles de UV en su latitud. Esto se debe probablemente a dos factores. El primero es que no hace tanto que habitan esas zonas climáticas; han emigrado a América del Norte sólo hará unos 5000 años. El segundo estriba en la extraordinaria abundancia de alimentos que contienen vitamina D, en especial pescado y mamíferos marítimos, en la dieta tradicional de los inuit. Su ingesta rica en vitamina D compensa el problema que les supondría el que su piel no sintetice vitamina D en latitudes tan septentrionales; les permite, pues, conservar una piel más oscura.

Gracias a nuestro análisis de la capacidad potencial de sintetizar la vitamina hemos comprendido otra característica relacionada con el color de la piel humana: las mujeres de todas las poblaciones tienen de ordinario una piel más clara que los hombres (nuestros datos muestran que tiende a ser entre un 3 y un 4 por ciento más clara que la de los hombres). Los científicos han conjeturado a menudo cuáles podrían ser las razones. La mayoría argumenta que el fenómeno surge de la selección sexual: los hombres preferirían mujeres de color más claro. Nosotros mantenemos que, aunque ésa sea probablemente parte de la explicación, no es la razón original de la diferencia sexual. Las mujeres tienen necesidades de calcio bastante más elevadas en su vida reproductora, sobre todo durante el embarazo y la lactancia, y deben aprovechar al máximo el contenido en la dieta. Proponemos, por tanto, que las mujeres tienden a tener un color un poco más claro que los hombres para permitir que penetren más rayos UVB en su piel y aumente con ello su capacidad de producir vitamina D. En zonas del mundo donde se recibe una gran cantidad de radiación UV, las mujeres se encuentran en el filo de la navaja de la selección natural: por un lado han de maximizar la función fotoprotectora de la piel y, por el otro, la capacidad de sintetizar vitamina D.

Punto de convergencia de la cultura y la biología

A medida que el ser humano moderno fue desplazándose, hará unos 100.000 años, por el Viejo Mundo, su piel se adaptó a las condiciones am-

Los autores

NINA G. JABLONSKI y GEORGE CHAPLIN trabajan en la Academia de Ciencias de California, en San Francisco, donde Jablonski es conservadora de antropología y Chaplin investigador asociado del departamento de antropología. Jablonski se centra en las adaptaciones evolutivas de monos, antropoides y humanos. Está particularmente interesada en cómo han ido reaccionando los primates a los cambios habidos con el tiempo en el entorno mundial. Chaplin es además consultor privado de sistemas de información geográfica; se ha especializado en la descripción y análisis de las tendencias geográficas de la biodiversidad. En 2001 recibió el premio "Estudiante del Año" de la Asociación de Información Geográfica de Londres por su tesina sobre las correlaciones entre el entorno y color de la piel.

PIEL Y MIGRACION

LA PIEL DE LOS PUEBLOS que han habitado una zona determinada durante milenios se ha adaptado para permitir la producción de vitamina D sin dejar de proteger la concentración de folato. Los tonos de la piel de los inmigrantes más recientes tardarán miles de años en adaptarse; los individuos de piel clara quedan así expuestos al riesgo de padecer cáncer de piel y los de piel oscura sometidos a una deficiencia de vitamina D.

RESIDENTES DESDE ANTAÑO — INMIGRANTES RECIENTES

AFRICA DEL SUR: ~20-30 ºS



Khoisan (Hotentote)



Zulú: llegó hace unos 1000 años



AUSTRALIA: ~10-35 ºS



Aborigen

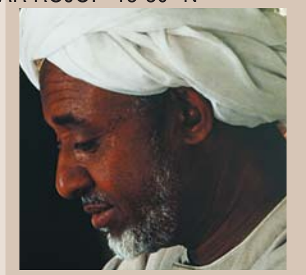


Europeo: hace ~300 años

MARGENES DEL MAR ROJO: ~15-30 ºN



Sudanés



Arabe: hace ~2000 años

INDIA: ~10-30 ºN



Bengalí



Tamil: hace ~100 años

bientales prevalecientes en las distintas regiones. El color de la piel de los indígenas de Africa ha tenido tiempo más que suficiente para adaptarse porque el hombre anatómicamente moderno evolucionó primero allí. Los cambios del color de la piel que sufrió a medida que avanzaba de un continente a otro —primero hacia Asia, después hacia Austro-Melanesia, luego hacia Europa y, por último, hacia América—, pueden reconstruirse hasta cierto punto. Importa recordar, sin embargo, que esos seres humanos disponían de vestido y refugio para protegerse de los elementos. En algunos lugares supieron dar con alimentos extraordinariamente ricos en vitamina D. (Pensemos en los inuit.) Ambos factores ejercieron efectos profundos en el tiempo y en el grado de la evolución del color de la piel en las poblaciones humanas.

Desde el punto de vista del entorno, Africa es un continente heterogéneo. Algunos de los primeros desplazamientos de los humanos contemporáneos fuera del Africa Ecuatorial los llevaron al Africa meridional. Los descendientes de algunos de esos colonizadores, los khoisan (antes conocidos como hotentotes), se encuentran aún en Africa meridional y tienen una piel bastante más clara que los africanos ecuatoriales indígenas, clara adaptación a los niveles más bajos de radiación UV que prevalecen en el extremo meridional del continente.

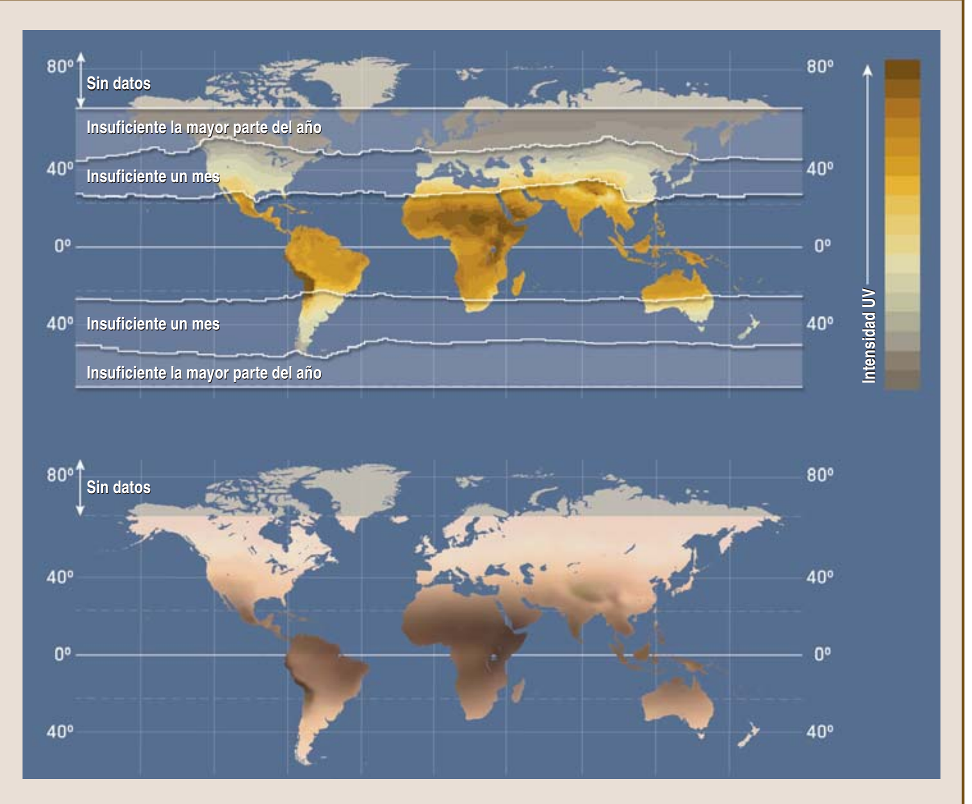
Llama la atención, sin embargo, que el color de la piel en Africa meridional no sea uniforme. Las poblaciones que hablan lenguas bantúes emigraron a esta región recientemente —probablemente en los últimos 1000 años— desde zonas del Africa occidental cercanas al ecuador. Las diferencias en el color de la piel entre los khoisan y los que hablan lenguas bantúes, como los zulúes, indican que el tiempo que un grupo ha habitado una región determinada cuenta a la hora de comprender su color.

Es probable que el comportamiento cultural haya influido mucho en la evolución del color de la piel en la historia humana reciente. Su efecto puede verse en los pueblos indígenas que viven en las márgenes orientales y occidentales del mar Rojo. Se piensa que las tribus de la zona occidental, que hablan lenguas nilo-hamíticas, han habitado esta región por lo menos desde hace 6000 años. Se distinguen por una piel muy pigmentada y cuerpos delgados y longilíneos, con extremidades largas; esas características constituyen una adaptación biológica excelente para disipar el calor y la intensa radiación UV. En contraste, los grupos modernos dedicados a la agricultura y al pastoreo de la margen oriental del mar Rojo, en la península Arábiga, han vivido allí sólo desde hace unos 2000 años. Estos primeros pueblos árabes, de origen europeo, se han adaptado a condiciones ambientales muy semejantes con medios casi exclusivamente culturales: se cubren con pesadas vestimentas y hacen sombra con toldos. Sin este tipo de protecciones, habría debido esperarse que su piel hubiera comenzado a oscurecerse. Por lo general, cuanto más reciente ha sido la migración de un grupo hacia una zona, tanto más amplia es la adaptación cultural.

PETER JOHNSON *Corbis (khoisan)*; BARBARA BANNISTER *Gallo Images/Corbis (zulú)*; PENNY TWEEDIE *Corbis (aborigen)*; DAVID McLAIN *Aurora (europeo)*; ERIC WHEATER *Lonely Planet Images (sudanés)*; WAYNE EASTEP *Getty Images (árabe)*; ROGER WOOD *Corbis (bengalí)*; JEREMY HORNER *Corbis (tamil)*

¿QUIEN FABRICA SUFICIENTE VITAMINA D?

LAS POBLACIONES que viven en los trópicos reciben suficiente luz ultravioleta (UV) del sol (*mapa superior, marrón y naranja*) para sintetizar vitamina D todo el año. No así las que habitan en latitudes más al norte y al sur. En las zonas templadas (*bandas un poco sombreadas*), se carece de la luz UV necesaria para sintetizar vitamina D un mes al año; quienes viven más cerca de los polos (*banda más oscura*) no reciben luz UV suficiente la mayoría de los meses para la síntesis de vitamina D. Los mapas de abajo muestran los colores de la piel humana que se predicen conforme a los niveles de luz UV. En el Viejo Mundo, el color de la piel de los pueblos indígenas se acerca bastante a lo predicho. En el Nuevo Mundo, sin embargo, el color de la piel de los residentes primitivos es de ordinario más claro que lo esperado, probablemente a causa de su reciente emigración y de otros factores, la dieta por ejemplo.



Peligros de las migraciones recientes

A pesar de las grandes mejoras habidas en el último siglo en todo lo relacionado con la salud, vuelven a darse, o a emerger, algunas enfermedades en poblaciones antes poco afectadas por ellas. Una de estas es el cáncer de piel, especialmente los carcinomas de células basales y escamosas, en los pueblos de piel clara. ¿Por qué surgen ahora esas enfermedades?

No siempre las adaptaciones biológicas y culturales siguen el paso de los movimientos de los humanos de una zona con un cierto patrón de radiación UV a otra con un patrón diferente. La gente de piel clara de origen noreuropeo que se broncea en el sur de Florida o el norte de Australia empieza a pagar las consecuencias, en forma de envejecimiento prematuro de la piel y cánceres de la piel, dejando aparte el costo desconocido en vidas humanas de la desaparición del folato. Por otro lado, muchas personas de piel oscura originarias del sur de Asia y de Africa que ahora viven en el norte del Reino Unido, Europa septentrional o el nordeste de Estados Unidos, sufren una falta de radiación UV y vitamina D, problema insidioso que se manifiesta en tasas elevadas de raquitismo y otras enfermedades relacionadas con la deficiencia de vitamina D.

La capacidad del color de la epidermis de adaptarse, con el paso de largos períodos de tiempo, a los diversos entornos adonde los seres humanos han ido trasladándose refleja la importancia de la piel para la supervivencia. Pero a su naturaleza inestable se debe también que resulte una de las características menos útiles para determinar las relaciones evolutivas entre los grupos humanos. Antaño, los antropólogos se valieron del color de la piel para caracterizar las razas humanas. Pero ese criterio erróneo, y en eso consiste la fuerza de la ciencia, puede ya corregirse. Nuestros conocimientos actuales sobre la evolución de la piel humana indican que la adaptación al ambiente mediante la selección natural explica las variaciones del color de la piel igual que da cuenta de la mayoría de nuestras características físicas. Esperamos el día en que desaparezcan los vestigios de viejos errores científicos y los reemplace un mejor conocimiento de los orígenes y la diversidad del ser humano. La diversidad del color de la piel debe celebrarse como una las manifestaciones más visibles de la evolución del hombre.

SARA CHEN

Bibliografía complementaria

THE EVOLUTION OF HUMAN SKIN COLORATION. Nina G. Jablonski y George Chaplin en *Journal of Human Evolution*, vol. 39, n.º 1, págs. 57-106; 1 de julio de 2000.

WHY SKIN COMES IN COLORS. Blake Edgar en *California Wild*, vol. 53, n.º 1, págs. 6-7; invierno 2000.

THE BIOLOGY OF SKIN COLOR: BLACK AND WHITE. Gina Kirchweger en *Discover*, vol. 22, n.º 2, págs. 32-33; febrero de 2001.



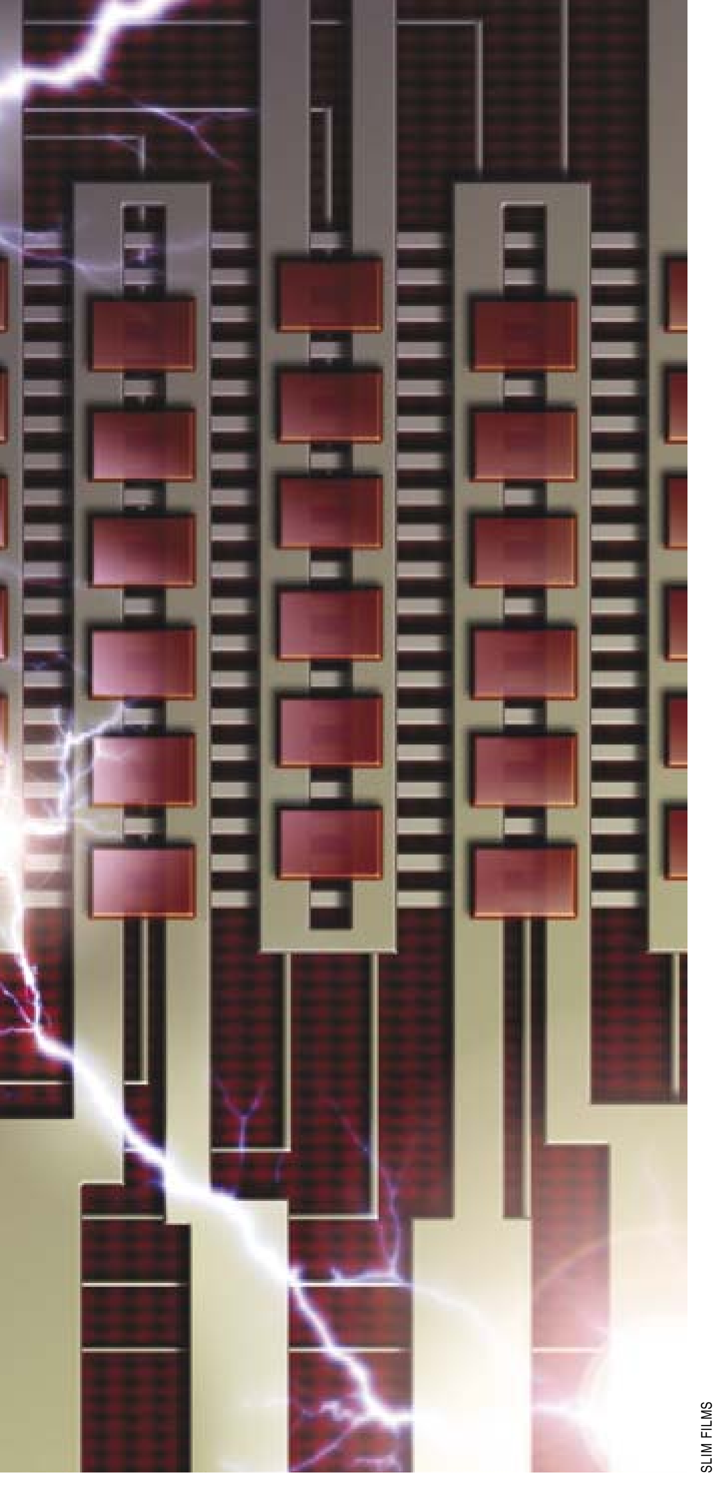
Pararrayos en nanoelectrónica

Las descargas electrostáticas amenazan el progreso de la miniaturización y de la velocidad en los futuros dispositivos electrónicos

Steven H. Voldman

No nos son desconocidos los efectos de la carga electrostática: basta con que calcemos playeras y arrastremos los pies por una alfombra de pelo; percibiremos la ligera comezón que causa el salto repentino a otro objeto de la carga eléctrica que el frotamiento con la alfombra acumula. Pero las consecuencias son mucho peores para los equipos electrónicos modernos.

En un día seco de invierno, caminar sobre una alfombra nueva puede generar una descarga de 35.000 volt. No sufrimos daño alguno con este voltaje porque la cantidad de carga que circula es insignificante. Insignificante, pero suficiente para destruir delicados componentes microelectrónicos. Para prevenir tal destrucción se han ideado ingeniosos métodos. A medida que se reducen, sin embargo, los circuitos se vuelven más sensibles a la descarga electrostática (DE) y ya no valen los viejos trucos. ¿Podremos seguir encontrando nuevas formas de evitar los desperfectos electrostáticos sin que el ritmo de la innovación disminuya?


SLIM FILMS

COMO SI FUERAN DIMINUTOS RAYOS, las descargas de electricidad estática pueden echar a perder los microcircuitos. En los chips los detalles son cada vez menores y más delicados; los diseñadores deben por eso mejorar las medidas de protección contra las descargas electrostáticas.

Quienes gustan de hurgar en sus ordenadores saben que, cuando los abren, deben "ponerse a tierra", quizá tocando la carcasa metálica de un radiador o conectando sus dedos a un objeto metálico por medio de un cable. Esa puesta a tierra desvía cualquier carga acumulada a otro cuerpo. Los microprocesadores y demás chips llevan incorporados circuitos de protección, pero habrá que protegerlos aún más en futuros equipos. La DE es un problema no sólo para los aparatos terminados, sino también mientras se los construye, desde la fabricación de obleas al empaquetado y al montaje de los sistemas completos. Cada paso tiene sus propios riesgos electrostáticos.

En general, la electrostática plantea la máxima amenaza para los componentes durante su fabricación e instalación. Tiene menor importancia una vez ya están incorporados en los aparatos, en un ordenador, por ejemplo. Algunos métodos de protección se basan explícitamente en esta suposición (*véase el recuadro* "Fabricación de láseres y LED más robustos"). Se corre ya riesgo en las primeras etapas de la fabricación: hasta las plantillas fotolitográficas, que actúan de manera completamente mecánica, se hallan en peligro. El principal riesgo para la microelectrónica es el daño que el calentamiento y la ruptura eléctrica de las capas aislantes produce a los elementos activos. Las cabezas de los discos duros, sin embargo, se enfrentan a sus propios y peculiares problemas, como los aspectos magnéticos de las descargas y ciertas consideraciones aerodinámicas.

Los microchips incorporan dispositivos de protección contra las DE desde la década de 1960; estas salvaguardas han evolucionado desde entonces según las necesidades técnicas y las estrategias empresariales. El principal objetivo de cada nueva generación de artefactos microelectrónicos es perpetuar la ley de Moore con elementos, con transistores, menores y más rápidos. Algún día, en un futuro no demasiado lejano, la industria topará con un obstáculo insalvable que impida nuevos progresos. Se alcanzará el punto en que no se pueda diseñar ni construir un transistor menor y más rápido. Pero quizá se presente antes otro obstáculo; aunque se pueda construir el siguiente transistor, será inútil si no hay forma de protegerlo bien contra la DE. No se sabe cuál será el primero de estos muros que debamos superar.

Aceleración térmica

¿Cuál es la causa de que la electrónica falle cuando hay una DE? La principal es el calor generado por la corriente eléctrica de la descarga, que puede llegar a fundir el material. Cuando ocurre una DE, las temperaturas internas rebasan incluso los 1500 grados centígrados, valor superior a los puntos de fusión del aluminio, el cobre y el silicio. El daño se produce incluso sin fusión. Las propiedades de los diodos y los transistores están determinadas por el dopaje del semiconductor: átomos de impurezas cuidadosamente introducidos, o dopantes, definen regiones con propiedades electrónicas específicas. El calentamiento excesivo permite la migración de los dopantes; se degrada entonces la estructura exacta de las regiones, esencial para que el dispositivo funcione como es debido.

Dos procesos, la constricción de la corriente electrónica y la aceleración térmica, empeoran las cosas al concentrar el calentamiento en un punto: cuando una zona de un

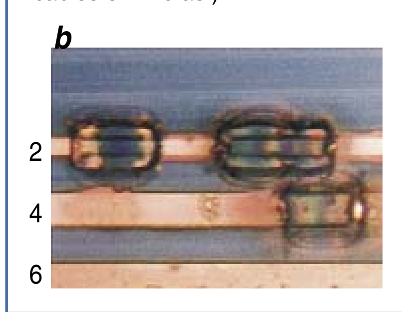
DAÑOS DE LAS INTERCONEXIONES

PUEDE DAÑAR LAS INTERCONEXIONES entre componentes y capas de los chips el calentamiento excesivo que sufren cuando el impulso de corriente de una descarga electrostática las atraviesa. Las interconexiones de aluminio van insertadas entre láminas delgadas de titanio, que se adhiere mejor al aislante contiguo. Cuando el cableado se calienta, el aislante, a cada lado, se resquebraja; el aluminio fundido rezuma entonces, como se ve aquí en un semiconductor de silicio sobre aislante que se sometió a una descarga de 7500 volt (*a*). Los cableados de cobre, más modernos, tienen un punto de fusión más elevado. El cobre se aloja en un conducto de tantalio. La capa de aislante que lleva encima se rompe cuando se calienta el cable (*b*). Al no cubrirlo ya el aislante, el cobre forma ampollas o se evapora (*c*). A temperaturas sumamente altas (3017 grados centígrados y superiores), las paredes de tantalio se funden y el cobre emerge del conducto (*d*). (Los números indican la anchura de los cables en micras.)

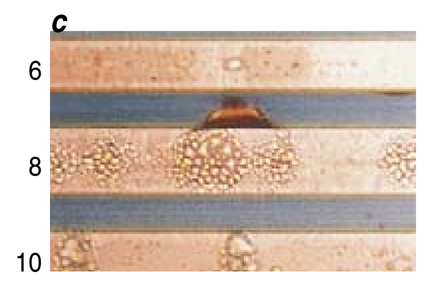
a



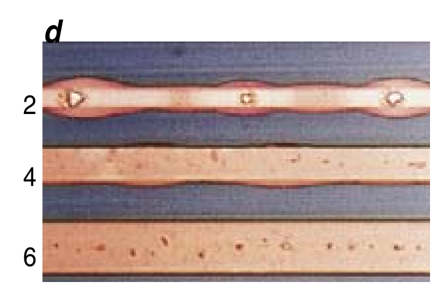
b



c



d



STEVEN H. VOLDMAN

semiconductor se calienta de manera considerable, su resistencia disminuye; circula más corriente, pues, por ella, y eso la calienta aún más. La geometría y la simetría del diseño desempeñan un papel fundamental en la distribución uniforme de la corriente en un dispositivo y en que se evite la aparición de la aceleración térmica. La conductividad térmica, la capacidad calorífica y la temperatura de fusión del material son propiedades importantes a la hora de determinar en qué medida almacena el calor o con cuánta uniformidad lo difunde.

Las conexiones eléctricas entre los distintos elementos no son menos importantes que los depurados transistores de los dispositivos modernos. Entre ellas se cuentan el cableado de interconexión, a lo largo de la superficie de las capas semiconductoras del chip, y las "vías" que unen las capas entre sí verticalmente. Junto con el resto del dispositivo, se reducen de tamaño a fin de mejorar la velocidad y la potencia de cálculo de los chips semiconductores de altas prestaciones. Durante muchos años, el aluminio fue el metal elegido para las interconexiones, pero funde a sólo 660 grados centígrados. La industria microelectrónica empezó a adoptar las interconexiones de cobre alrededor de 1997, tras 10 años de investigaciones, sobre todo por su mayor conductividad eléctrica, que facilitaba la construcción de circuitos menores y más rápidos. Cuenta con la ventaja adicional de un punto de fusión más alto, 1083 grados centígrados; proporciona a las interconexiones una mayor tolerancia al calentamiento.

En contraste con la transición al cobre, un cambio generacional en los materiales aislantes ha tenido un pequeño efecto negativo en la sensibilidad a las DE. Ya hay en el mercado dispositivos en los que las regiones aislantes entre las líneas metálicas están hechas de materiales de baja constante dieléctrica (k). La baja k de los materiales limita la capacitancia entre las líneas, lo

Resumen/*Protección electrostática*

- Lo más simple, una persona que anda sobre una alfombra, puede generar altos voltajes de carga electrostática. La microelectrónica moderna es muy delicada; se puede echar a perder por el impulso eléctrico de una descarga electrostática (DE). Basta manejar un chip para que ocurra una DE.
- Las descargas funden el metal y el silicio; pueden perforar orificios en las capas aislantes. La protección moderna contra las DE comprende el uso de materiales más robustos y una variedad de circuitos suplementarios en el chip que desvían las descargas de los elementos activos.
- Los dispositivos se vuelven más sensibles a las descargas a cada nueva generación de circuitos, con sus dimensiones siempre decrecientes; la protección contra las DE es un problema que se renueva. Si no se lograra resolverlo, se detendría el progreso de la miniaturización y se limitarían las prestaciones.

que a su vez reduce los "cruces", o interferencias, entre las líneas y aumenta la velocidad de propagación de las señales de alta frecuencia y de los impulsos breves. Por desgracia, los materiales de baja *k* tienen una conductividad térmica menor que el dióxido de silicio (el aislante tradicional, o dieléctrico); por eso no son tan eficaces en la disipación de energía generada en los episodios electrostáticos. Esta merma se ha tenido que compensar mediante un cuidadoso diseño eléctrico, interconexiones más anchas y otras vías de reducir el calentamiento. El efecto neto de la introducción conjunta de cobre y materiales de baja *k*, no obstante, reforzaría la robustez frente a las DE. Esta innovación contribuyó a que se llegara a las aplicaciones de un gigahertz (GHz).

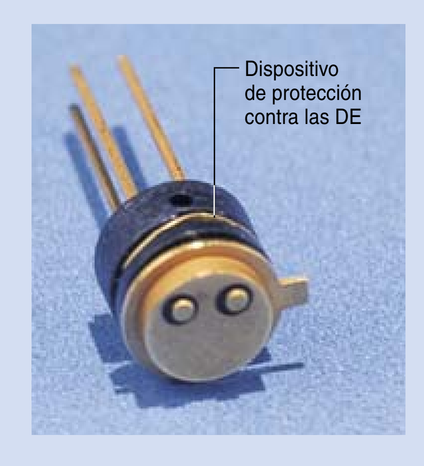
Fijémonos ahora en los transistores, elementos principales de los microchips. Hoy, la principal técnica digital es el dispositivo MOSFET, acrónimo en inglés de "transistor de óxido metálico semiconductor de efecto campo". La estructura básica del MOSFET consta de dos zonas dopadas, llamadas fuente y sumidero, separadas por una tercera zona, el canal. Un electrodo, la puerta, se encuentra sobre el canal, separado del mismo por una delgada capa de aislante de dióxido de silicio. El voltaje aplicado a la puerta controla la circulación de la corriente por el canal, entre la fuente y el sumidero.

Las últimas generaciones de estos dispositivos han entrado en la era de las nanoestructuras. En agosto, por ejemplo, Intel anunciaba sus planes de fabricar chips con puertas de cincuenta nanómetros de longitud y óxidos de puerta de un espesor de 1,2 nanómetros, lo que significa sólo cinco capas atómicas. Cuanto más fino es el aislante, menos voltaje se necesita para provocar la ruptura. La ruptura dieléctrica no está causada por el calentamiento, sino por portadores eléctricos (electrones o huecos) que rompen los enlaces moleculares y se abren camino a través del aislante como un diminuto rayo. Puede llamarse "picaduras" a los defectos formados por un fallo en el óxido. Si las capas de óxido son muy finas, la simple manipulación de los chips microelectrónicos llega a producir esos orificios en las puertas.

Fabricación de láseres y LED más robustos

Los láseres de semiconductores y los diodos emisores de luz (LED) se encuentran en todas partes, lo mismo en los supermercados que en una pantalla de gran tamaño. Aunque estos componentes están hechos de los mismos materiales que los microprocesadores, la integración de dispositivos de protección contra las descargas electrostáticas (DE) en las obleas semiconductoras tendría un coste prohibitivo. En las pantallas, el coste por unidad de área es importantísimo. En cuanto a los LED, son pequeños y van muy apiñados; cuentan con poco sitio para los circuitos de protección contra las DE. Se considera que la fragilidad ante las DE es una contrapartida aceptable. Los investigadores, por tanto, se están concentrando en lograr que los materiales de los LED sean, por naturaleza, más robustos frente a las DE.

David V. Cronin, de Polaroid, inventó una solución mecánica para proteger los diodos láser individuales mientras se los manipula: cuando el diodo no está en su receptáculo, unos flejes conductores de metal cortocircuitan los electrodos con la envuelta metálica del diodo (*véase la fotografía a la derecha*). Cualquier DE en los electrodos circulará hacia la envoltura en lugar de hacia el semiconductor del diodo. Cuando el diodo láser se inserta en su alojamiento, el fleje metálico se suelta.



BETH PHILLIPS

El autor

STEVEN H. VOLDMAN trabaja en el equipo de desarrollo de silicio-germanio de IBM, en Burlington. Durante sus años de formación académica fue miembro del Laboratorio de Investigación de Altos Voltajes del Instituto de Tecnología de Massachusetts y del grupo de investigación de fusión por espejo magnético de la misma institución. Posee cien patentes estadounidenses.

Electrones y huecos

La fuente y el sumidero de un MOSFET también son sensibles. Una DE en esas regiones conduce a la ruptura térmica del MOSFET. Cuando el alto voltaje de la descarga llega, digamos, al sumidero, en éste aumenta el campo eléctrico. El intenso campo acelera los electrones portadores de corriente; les imparte energía suficiente para liberar a otros electrones. Estos electrones secundarios (y los correspondientes huecos) aumentan aún más el flujo de corriente y se aceleran a su vez, con lo que liberan otros electrones, y así sucesivamente. Este proceso, llamado multiplicación por avalancha, hace que la corriente circule desde el transistor hacia el cercano sustrato; el transistor adquiere entonces un estado inestable de "resistencia negativa", agravándose aún más la situación. Al aumentar la corriente, el calentamiento lleva a la aceleración, o ruptura, térmica ya descrita.

El procedimiento principal para salvaguardar los delicados transistores consiste en incorporar en el chip circuitos de protección contra la DE que desvíen las corrientes de las descargas fuera del transistor, a tierra o hacia electrodos de alimentación. Otros circuitos pueden transferir entonces la corriente de una pista de alimentación a otra hasta que encuentre el potencial de tierra.

En las décadas de 1960 y 1970 estos dispositivos de DE eran por

EFECTOS DE LOS ALTOS VOLTAJES EN LOS SEMICONDUCTORES

Ruptura dieléctrica

a Las capas aislantes delgadas son vulnerables a la ruptura dieléctrica: un campo eléctrico suficientemente intenso crea cadenas de defectos moleculares que cruzan el aislante de un lado a otro, de forma similar a como se abre el rayo camino a través del aire. Los defectos quedan como "picaduras" permanentes.

b Debido a que el campo eléctrico es voltaje (V) por unidad de longitud, una capa más gruesa soporta un campo eléctrico más débil y resulta menos vulnerable que una más fina.

Multiplicación por avalancha

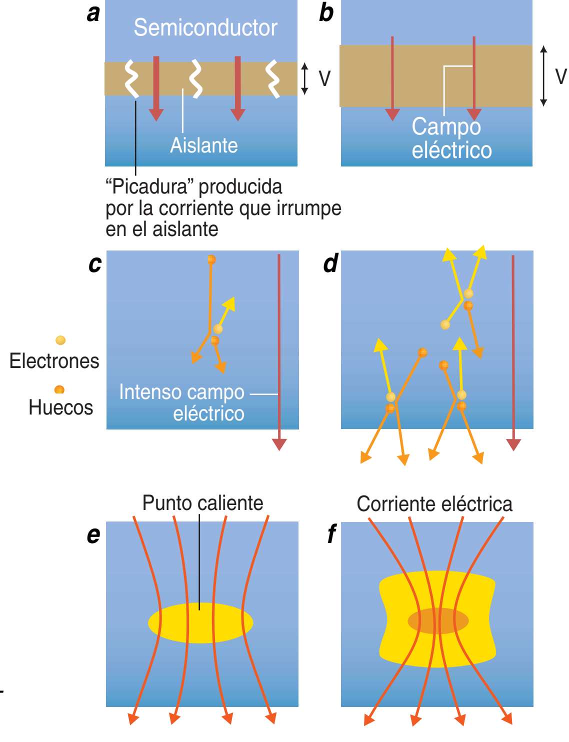
c La multiplicación por avalancha ocurre cuando un campo eléctrico demasiado grande actúa en un semiconductor. El campo acelera los electrones y los huecos hasta una energía suficiente para que liberen otros electrones y huecos, que se añaden a la corriente.

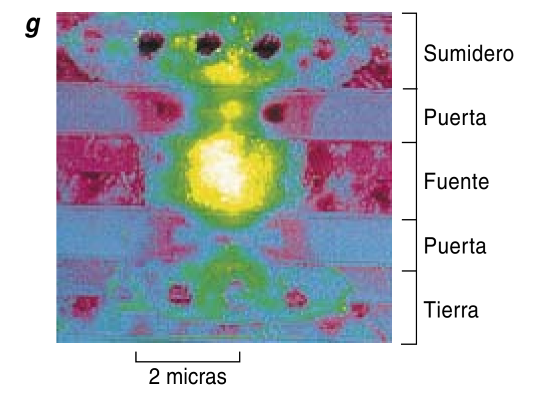
d El campo acelera estos portadores adicionales de corriente, que a su vez liberan más portadores en una cascada creciente que produce una corriente muy extensa.

Constricción de la corriente electrónica

e La resistencia en un semiconductor disminuye al aumentar la temperatura: si una zona se calienta de manera apreciable (*amarillo*), circulará más corriente por ella.

f El estrechamiento de la corriente aumenta el calentamiento (*naranja*), lo que, de nuevo, concentra la corriente.





Ruptura de los MOSFET

g En esta imagen, tomada con microscopio de fuerza atómica, de un MOSFET dañado por una descarga electrostática, se observa la constricción de la corriente electrónica. Los colores indican la altura del semiconductor. La gran figura verde y amarilla se debe al brote de silicio fundido.

lo general rectificadores controlados por silicio, pero en los decenios siguientes se utilizaron a menudo los MOSFET mismos, es decir, se protegía a los transistores con otros transistores. Los transistores de DE se diseñan de forma que tengan una robustez mucho mayor que los que protegen; es posible porque no han de rendir tan altas prestaciones como los transistores activos. Pero el rendimiento de éstos sufre con la adición de dichos circuitos; cada vez que se crea un microchip nuevo, se convierte en una tarea titánica optimizar el diseño de manera que se minimice tal desventaja.

Actualmente, el dispositivo de DE favorito es el diodo *p-n* de silicio, que soporta mayores descargas que un transistor de DE de tamaño similar. Se trata de un transistor limitado, pues debe enviar la corriente a través de su estrecho canal y su puerta ha de resistir la ruptura dieléctrica. La técnica CMOS (silicio complementario de óxido metálico), muy difundida, posee una estructura natural de diodo *p-n* que va desde el MOSFET hasta el sustrato de la pastilla; cabe adaptarla para que funcione como un dispositivo de DE. Es fácil incorporar diodos *p-n* adicionales que vayan hasta el sustrato, aunque la optimización todavía es problemática.

Desde 1995, más o menos, desde que las anchuras de las líneas de los circuitos disminuyeron hasta los 250 nanómetros e incluso menos, se han usado unos circuitos "inteligentes", unos "fijadores de nivel", para descargar la corriente de la DE a través de la etapa final, desde la pista de alimentación a tierra. Algunos fijadores aplican un simple filtro dependiente de la frecuencia para distinguir entre una señal normal y un impulso de DE. Otros detectan el exceso de voltaje de la descarga. Cuando el disposi-

ALICIA CALLE (*ilustraciones*); STEVEN H. VOLDMAN (*micrografía*)

tivo detecta el impulso, una señal alimentada por éste activa robustos circuitos de transistor que descargan la corriente con seguridad hasta tierra. Antes, hace mucho años, los transistores no respondían con la rapidez necesaria a la parte de mayor frecuencia de un impulso de DE, que puede ser de hasta un gigahertz. Los transistores modernos de alta velocidad se han liberado de ese inconveniente.

Hoy, todos los microprocesadores y otros muchos dispositivos, como los chips de radiofrecuencia, incorporan circuitos de protección contra las DE y fijadores de nivel. A cada nueva generación de circuitos, siempre de menor tamaño, resulta más difícil diseñar estos dispositivos; también ellos han de reducirse a la vez que proporcionan una mejor protección, y sin afectar a las prestaciones cada vez mayores de los transistores que protegen. Todavía no se sabe si bastarán estas técnicas en los futuros semiconductores.

Silicio sobre aislante

En la técnica microelectrónica del silicio sobre aislante, los métodos de protección contra las DE usados en los MOSFET tradicionales chocan con una dificultad. Prometen velocidades mayores mediante la reducción de la capacitancia del transistor (hay que recordar que la capacitancia retarda también las señales en las interconexiones metálicas). En los dispositivos de silicio sobre aislante, los elementos activos del circuito se disponen sobre una delgada lámina de silicio, separada del resto del sustrato de la pastilla por una capa de aislante. La presencia de la película aislante priva de una estructura natural de diodo que desvíe la DE, a través del sustrato, lejos de la electrónica sensible. En ausencia de diodos verticales, no cabe sino construir estructuras laterales en la lámina delgada de silicio. Al principio de las investigaciones, en 1994, algunos observadores dudaban de que fuera posible dotar a la técnica del silicio sobre aislante de la adecuada protección contra las DE. Mas para el año 2000, los diodos *p-n* laterales que van de las líneas de entrada de señal hasta las pistas de alimentación proporcionaban una excelente protección en la gama ordinaria de microprocesadores de silicio sobre aislante que fabrica IBM. Esta técnica seguirá siendo suficiente para los futuros dispositivos ultrafinos, en los que la capa de silicio no tendrá más de veinte nanómetros de grosor.

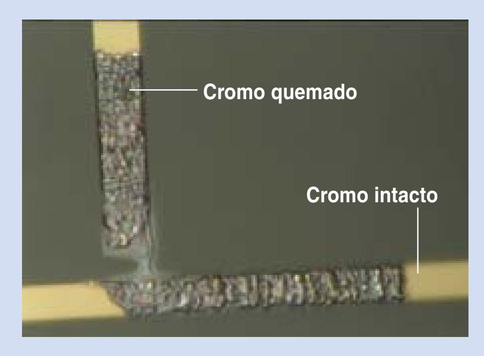
Los sistemas CMOS son muy apropiados para las aplicaciones digitales, para los microprocesadores por ejemplo, en parte porque consumen muy poca corriente en el estado 0, o apagado, y conducen eficazmente en el estado 1, o activado. No son tan apropiados para las comunicaciones de alta velocidad, a las que corresponde un papel cada vez más importante en la vida moderna, se trate de teléfonos móviles o de ordenadores portátiles y agendas personales digitales conectados a Internet, sea por cable o inalámbricamente. Este mercado continuará creciendo rápidamente en los años venideros. Las velocidades van aumentando de 10 a 100 GHz; se requieren circuitos menores y más rápidos, que por su propia naturaleza serán más sensibles a la DE. (Hay una técnica, el CMOS de radiofrecuencia, que trabaja entre 1 y 10 GHz, pero todavía no se utiliza por encima de 10 GHz.)

Dispositivos de silicio-germanio

En las aplicaciones de esta especie está reapareciendo el transistor dipolar, el dispositivo desplazado por el MOSFET, gracias a nuevos materiales, en especial el silicio-germanio (SiGe) y el arseniuro de galio (GaAs). Los transistores bipolares difieren de los transistores de efecto campo en que la corriente que circula entre dos regiones, llamadas emisor y colector, está controlada

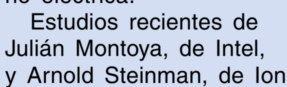
Chispas de las fotoplantillas

Las plantillas fotolitográficas, o "máscaras", determinan qué materiales y dónde se han de depositar en un dispositivo microelectrónico. Su funcionamiento a escalas cada vez más reducidas es vital para que continúe la miniaturización. Puede parecer sorprendente que la electrostática plantee un problema a estas fotoplantillas, cuya función es puramente mecánica y no eléctrica.



LOS DESPERFECTOS ELECTROSTATICOS de una fotoplantilla detuvieron la producción de un importante fabricante europeo de semiconductores. El defecto puente es de óxido de cromo.

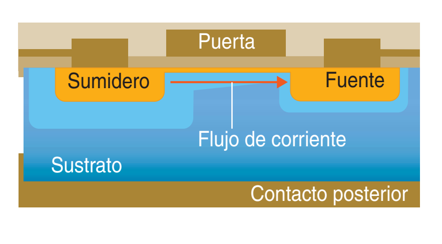
JAMES WILEY KLA-Tencor Corporation



Estudios recientes de Julián Montoya, de Intel, y Arnold Steinman, de Ion Systems, en Berkeley, muestran que las conformaciones dibujadas en las plantillas pueden cargarse, y luego descargarse en conformaciones contiguas; como consecuencia, las plantillas se estropean (*véase la micrografía*). Cuando la separación entre dos líneas es notable, se necesita un voltaje mayor para salvar el vano. Estas grandes descargas liberan suficiente energía como para producir un daño visible. Cuando las líneas están más juntas, sin embargo, las descargas se producen a voltajes menores; el desperfecto es menos visible y quizá se pase por alto en las inspecciones, aunque, de todas formas, resulte tan destructivo que eche a perder los dispositivos realizados con esa plantilla.

Para mejorar la fiabilidad de las fotoplantillas se recurre a aumentar, durante su montaje, la humedad y la ionización del aire (así se ayuda a disipar las descargas), o al control de la acumulación de carga en las herramientas de la fábrica. Las plantillas mismas se podrían fabricar en materiales disipadores que fuesen desprendiéndose poco a poco de la carga antes de que alcanzara un nivel peligroso. Aún queda mucho por saber acerca de los efectos de las descargas y del daño que causan a las plantillas.

RUPTURA TERMICA DE UN MOSFET

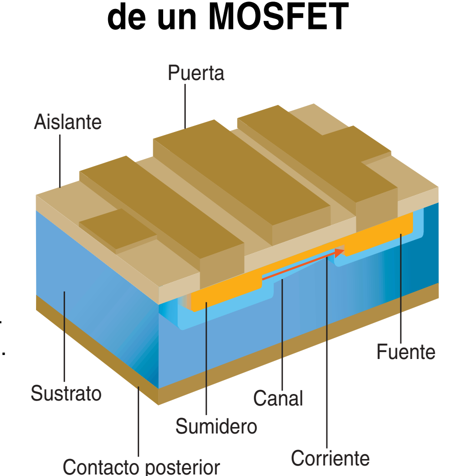


En el funcionamiento normal de un MOSFET, la corriente circula a través de un estrecho canal entre el sumidero y la fuente. El voltaje aplicado a la puerta activa o desactiva esta corriente.

Impulso de DE (alto voltaje)
Puerta
Sumidero
Fuente
1
2
3
Sustrato
Contacto posterior
Zona de máximo calentamiento

Cuando el altísimo voltaje del impulso de una descarga electrostática (DE) llega al sumidero, la corriente que parte de este electrodo se vuelve muy grande (*1*) debido a la multiplicación por avalancha (*véase el recuadro* "Efectos de los altos voltajes en los semiconductores"). Esta corriente circula a través del sustrato y llega al contacto en la parte posterior (*2*), lo que cambia el voltaje en el sustrato, hasta que el transistor se recupera y la corriente circula nuevamente hacia la fuente (*3*). Por lo general, el calentamiento máximo ocurre donde se unen el sumidero y el canal.

Estructura de un MOSFET



Impulso de DE
Señales normales
Puerta
Sumidero
Fuente
Sustrato
Contacto posterior

Los circuitos de protección contra las DE deben desviar el impulso antes de que llegue a los transistores del chip, pero no deben perturbar en otras situaciones el flujo normal de señales de datos o los estados de los transistores activos.

por una pequeña corriente que entra en una región intermedia, la base. La banda prohibida de energía —una propiedad que caracteriza a los semiconductores— determina a qué se parecerá más el material, si a un conductor o a un aislante. Mediante la manipulación de la banda prohibida, se pueden construir transistores que funcionen cien veces más rápido que en silicio puro. Los fabricantes de transistores controlan el ancho de la banda prohibida directamente en la base de un transistor de SiGe; para ello, ajustan el porcentaje de germanio. A un transistor cuyas regiones tengan diferentes bandas prohibidas de energía se le llama transistor bipolar de heterounión. (En 2000 se concedió el premio Nobel de física a Herbert Kroemer por su contribución al desarrollo de estos dispositivos.) Los transistores de SiGe se usan en osciloscopios de alta velocidad, teléfonos móviles, dispositivos GPS y comunicaciones muy veloces.

Se pueden combinar las ventajas del SiGe con las del CMOS construyendo transistores de SiGe sobre una capa de ordinario CMOS, la vieja técnica de silicio. Se protege a estos artilugios de las DE de manera muy similar a como se protege a los de CMOS: unos diodos construidos en el SiGe a partir de transistores bipolares desvían la corriente de los transistores de SiGe; los diodos y MOSFET normales hacen lo mismo para los componentes CMOS.

Estas técnicas han funcionado bien hasta los 100 GHz. ¿Qué ocurrirá a partir de esa velocidad? (IBM ya ha probado transistores de 200 GHz en el laboratorio y está fabricando dispositivos de 120 GHz.) Para frecuencias de unos cientos de gigahertz, es probable que tengamos que empezar desde cero, con una forma completamente diferente de protección contras las DE.

Otras heterouniones se construyen con arseniuro de galio, que tiene mejores características eléctricas que el silicio. Los físicos emplean GaAs de muy alta calidad para estudiar el efecto Hall cuántico fraccionario y otros fenómenos singulares. Comercialmente, el GaAs se encuentra en los amplificadores de potencia y las interconexiones ópticas que unen circuitos electrónicos y fibras ópticas. Se utiliza mucho en la astronáutica, tanto en los satélites como en las sondas interplanetarias.

Difícil es fabricar con GaAs los dispositivos CMOS estándar. En el silicio cabe hacer las capas aislantes de dióxido de silicio, pero no existe un óxido comparable en el caso del GaAs. La falta de este óxido también impide el tipo de protección contra las DE que llevan los mecanismos basados en el silicio, en el silicio sobre aislante o en el SiGe. Por esa razón, los dispositivos de GaAs son, en comparación, más sensibles a las DE: pocos resistirían el contacto con una persona portadora de sólo mil volt, y mucho

ALICIA CALLE

menos los varios miles de volt que se generan en cuanto se anda sobre una alfombra.

Vanos de chispas

La protección contra las DE tiene gran importancia en la astronáutica; en las superficies de los vehículos espaciales se acumula carga eléctrica procedente de los cinturones de Van Allen, cercanos a la Tierra, o de las partículas que emanan del Sol. Los electrones de alta energía penetran en los dispositivos y acumulan carga en las tarjetas de circuitos internas. La consecución de una adecuada protección contra las DE para el GaAs será un problema difícil, pero el éxito de futuras misiones depende de ello.

Hace casi diez años, Karlheinz Bock, entonces en la universidad alemana de Darmstadt, presentó un nuevo tipo de protecciones para los chips de GaAs: los dispositivos de emisión de campo, o vanos de chispas. Consisten en unas configuraciones cónicas labradas en el GaAs; entre la punta del cono y otra parte del dispositivo queda un vano ocupado por aire. El voltaje de una descarga produce un campo eléctrico muy alto en la afilada punta; las chispas que cruzan el vano descargan el voltaje. Los dispositivos de emisión de campo ofrecen cierto número de ventajas sobre la protección contra las DE basada en diodos y transistores. En primer lugar, tienen una baja capacitancia y por lo tanto un mínimo impacto en el funcionamiento normal del dispositivo. Pero es aún más importante que puedan descargar corrientes altas, repetidas veces además. Cuando pasen del laboratorio a los artefactos prácticos, los dispositivos de emisión de campo proporcionarán a los amplificadores de potencia y las aplicaciones espaciales que utilizan GaAS el nivel de protección contra las DE que necesitan.

En los próximos años, los métodos tradicionales de protección de los semiconductores contra las DE quizá dejen de valer en dispositivos más rápidos y de dimensiones menores. Es posible que se adopten soluciones del estilo de los vanos de chispa, no sólo cuando se emplee GaAs. O bien, se fabricarán transistores más robustos, por su propia naturaleza, con materiales nuevos y se confiará en dispositivos externos a los chips para evitar que los impulsos de DE alcancen los nanocircuitos.

Inimaginable habría sido para Tales de Mileto, cuando estudiaba la carga electrostática, que 26 siglos después ese fenómeno influiría en el rumbo y la fiabilidad de la técnica y seguiría siendo objeto de estudio. No se van a interrumpir la investigación y el desarrollo relativos a la carga y descarga de los semiconductores, las cabezas magnéticas de grabación, las fotoplantillas y otras nanoestructuras. Inventos y patentes de circuitos contra las DE florecerán a medida que los dispositivos vayan reduciéndose y nuevas disciplinas caigan en la cuenta de la importancia de la electrostática.

Magnetismo y electrostática

El sector de la grabación magnética se vale de elementos magnetorresistentes para leer la información almacenada en los discos de ordenador. La cabeza de lectura es una oblea de carburo de titanio con una banda de película delgada de material magnetorresistivo. A medida que la cabeza barre el disco, las variaciones en el campo magnético de éste modifican la resistencia de la banda; así se traduce la señal en un voltaje. Como la densidad de información en el disco aumenta a cada nuevo diseño de disco duro, la banda magnetorresistente se ha de fabricar otro tanto más estrecha.

Las descargas electrostáticas plantean diversas amenazas, aparte de la fusión de la banda magnetorresistente. La corriente de una descarga puede producir un campo magnético que altere los datos grabados en el disco. Discos y cabezas se mueven a altas velocidades muy cerca entre sí: se ha comparado esa situación a un caza que volase a 30 metros del suelo. Una diminuta ampolla o nódulo producidos por la DE puede arruinar la aerodinámica de este vuelo y provocar un desastre.

Las cabezas magnetorresistentes de los modelos primitivos no llevaban dispositivos que protegiesen de las DE. Eran mayores y menos sensibles; no había una oblea de silicio sobre la que construir las protecciones ordinarias. La protección habría sido cara. No hace mucho que los expertos en la parte magnética de las unidades han empezado a abordar las cuestiones electrostáticas.

Se han construido, junto a las cabezas magnetorresistentes, fusibles de baja resistencia que sirven de camino alternativo de la corriente y permiten evitar averías durante la fabricación. Las soluciones mecánicas cortocircuitan los cables que llegan a la cabeza, a fin de que no haya averías durante el montaje de los discos duros. (Recuerda a los flejes de los diodos láser mencionados en el recuadro “Fabricación de láseres y LED más robustos”.) Los nuevos diseños de cabezas instalan elementos magnéticos en obleas de silicio; se obtiene así una protección integrada, como la que llevan los microprocesadores.

Con todo, esas cabezas de lectura siguen figurando entre los dispositivos más sensibles a las DE. Voltajes de descarga de sólo unos 35 volt pueden causar daños en las cabezas de lectura que se usan hoy, basadas en un efecto de magnetorresistencia gigante. La próxima generación de cabezas de lectura, la de los dispositivos magnetorresistentes de túnel, se fundamentará en el efecto túnel cuántico entre películas magnéticas. Serán aún más frágiles: una descarga de sólo 10 volt creará problemas. Ese nivel de sensibilidad dificulta mucho su fabricación. Los investigadores desconocen si podrán superar tales obstáculos.

Bibliografía complementaria

BASIC ESD AND I/O DESIGN. Sanjay Dabral y Timothy J. Maloney. John Wiley & Sons, 1998.

INVESTIGATING A NEW GENERATION OF ESD-INDUCED RETICLE DEFECTS. James Wiley y Arnold Steinman en *Micro*, vol. 17, n.º 4, páginas 35-40; abril 1999.

ESD IN SILICON INTEGRATED CIRCUITS. Segunda edición. Ajith Amerasekera y Charvaka Duvvury. John Wiley & Sons, 2002.

Mutación y resistencia a los antibióticos

Los antibióticos no se limitan a seleccionar cepas resistentes. Incrementan también la tasa de mutación de las bacterias, acelerando la variabilidad genética y aumentando, por tanto, las posibilidades de adquisición de resistencia

Fernando Baquero, Jesús Blázquez, José Luis Martínez

Imaginemos que la especie humana fuera un peligroso parásito de un organismo evolutivamente superior y con un tipo de inteligencia impensable para nosotros. Imaginemos también que este organismo, cansado de sufrir enfermedades a nuestra costa, hubiera desarrollado distintos compuestos químicos para eliminarnos: uno destinado a impedirnos respirar, otro dedicado a inhibir la circulación sanguínea y un tercero que provocara un fallo completo de los sistemas digestivo y excretor. Imaginemos por último que, como consecuencia de la variabilidad genética inherente a la especie humana, uno de cada cien millones de individuos fuera capaz de resistir a todos estos ataques. En otras palabras, al servirse de cada uno de estos compuestos químicos, la población del planeta quedaría reducida a tan sólo 50 personas. La comunidad humana se extinguiría, porque es difícil imaginar que estos 50 individuos (supuesto que hubiera machos y hembras en edad fértil entre ellos) pudieran encontrarse unos a otros y desarrollar una nueva progenie resistente. Si se utilizara más de un solo agente, la situación sería incluso más grave: los individuos resistentes a uno de los agentes serían sensibles a los demás y no habría ningún superviviente.

Este es el escenario en el que se encuentran las poblaciones bacterianas cuando se enfrentan a los antibióticos. Pero el resultado final no es el expuesto para los humanos. A lo largo de la historia reciente, han desaparecido muchas especies de organismos, en demasiados casos como consecuencia de la actuación, directa o indirecta, del hombre.

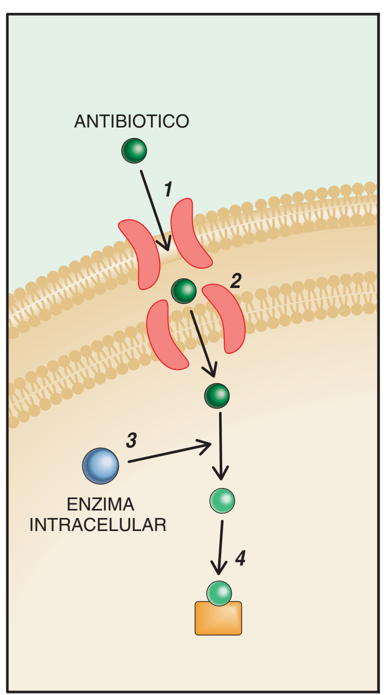
Sin embargo, en pocas ocasiones el hombre ha actuado de forma sistemática para eliminar un determinado ser vivo. Entre tales excepciones sobresale el tratamiento con antibióticos de las bacterias patógenas. Desearía su erradicación, pero se ha visto incapaz de eliminar ninguna de las bacterias que nos infectan. Es más, éstas han venido haciéndose resistentes a los tratamientos. Hay ya bacterias "blindadas" para los métodos clásicos de antibioterapia (*véase el recuadro* "La resistencia a los antibióticos"). ¿Cuál es la causa del éxito impresionante de esos microorganismos en su lucha para resistir los tratamientos a los que le somete el hombre? Variabilidad genética y selección de variantes microbianas resistentes a los antibióticos.

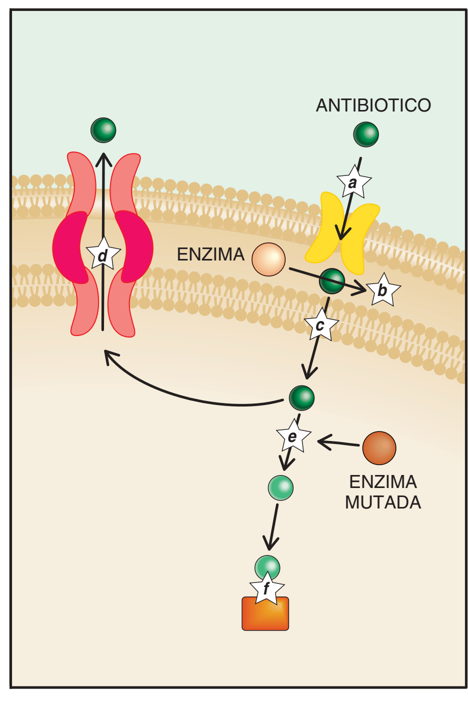
Todos los organismos comparten una misma necesidad de adaptarse a ambientes diferentes, cambiantes o ambos. Por ello, la selección natural ha permitido la evolución de mecanismos que facilitan la adaptación a diferentes estímulos ambientales. A menudo, las bacterias han de habérselas con ambientes desfavorables; deben ser capaces de adaptarse rápidamente a los mismos, so pena de exponerse a la extinción.

El ambiente más hostil en el que se puede encontrar una bacteria es aquel en el que hay compuestos tóxicos que, como los antibióticos, se hallan específicamente diseñados para matarla. Pero las bacterias poseen ventajas sobre los humanos

Los autores

FERNANDO BAQUERO, JESUS BLAZQUEZ y JOSE LUIS MARTINEZ estudian los mecanismos de resistencia a los antibióticos y los mecanismos evolutivos de las poblaciones bacterianas. Baquero y Blázquez trabajan en el Servicio de Microbiología del Hospital Ramón y Cajal de Madrid; Martínez, en el Centro Nacional de Biotecnología, perteneciente al Consejo Superior de Investigaciones Científicas y radicado en Madrid también.





1. MECANISMOS DE RESISTENCIA A LOS ANTIBIOTICOS. Para que un antibiótico pueda ejercer su acción, tiene que atravesar distintas envueltas celulares (*1* y *2*), bien de modo inespecífico, bien por transportadores específicos. En algunos casos, el antibiótico ha de activarse por enzimas intracelulares (*3*), antes de alcanzar su blanco de acción (*4*) y matar a la bacteria. La resistencia a los antibióticos puede deberse a mutaciones que afectan a una u otra de las diversas etapas necesarias para la actividad del antibiótico o a la presencia de sistemas de detoxificación activos contra los antibióticos. Así, una bacteria puede hacerse resistente porque se produzca una mutación en los transportadores, de modo que no se permita la entrada del antibiótico (*a*), porque los transportadores no se sinteticen (*c*), porque haya enzimas que inactiven el antibiótico (*b*), porque haya sistemas capaces de expulsar el antibiótico desde el interior celular (*d*), porque la enzima que activa el antibiótico ha mutado y ahora no le reconoce (*e*) o porque el blanco del antibiótico se ha modificado de suerte tal, que ahora no interacciona con el mismo (*f*).

FERNANDO BAQUERO, JESUS BLAZQUEZ Y JOSE LUIS MARTINEZ

para resolver este problema. Por dos razones principales: su número y su forma de multiplicación. La cifra de bacterias en una placa de cultivo supera al número de individuos de la especie humana; ello significa que hay individuos bacterianos “seleccionables” por su resistencia prácticamente en cualquier ambiente. Además, la reproducción bacteriana es asexual. Gracias a la misma, una bacteria resistente puede dar lugar a una progenie resistente sin necesidad de encontrar una bacteria de “otro sexo”.

Hasta ahora sólo hemos mencionado las estrategias de supervivencia “basales”, tanto en humanos como en bacterias, esto es, las meramente dependientes de su número y de su forma de reproducción. Pero los humanos, bajo el estrés del ataque químico de ese ser suprahumano imaginario, intentarían incrementar sus recursos adaptativos, que se fundan principalmente en la actividad investigadora (dar lugar a un aumento en la variedad de conocimientos). Las bacterias bajo estrés también aumentan sus recursos adaptativos.

Adaptación bacteriana

La adaptación bacteriana a los cambios operados en el entorno se produce a través de una triple vía: mecanismos de respuesta inmediata, adquisición horizontal de nuevos genes y cambio genético por mutación.

Las bacterias se apoyan en mecanismos de respuesta inmediata para adaptarse a ciertos factores de estrés. Igual que en los humanos, en ellas el estrés resulta de la existencia de una diferencia entre necesidades y posibilidades. Si una bacteria detecta una proteína que podría usar como nutriente, y no posee proteasas activas, induce la síntesis de tales enzimas para que sus posibilidades respondan a sus necesidades. En situación de máximo estrés, tal que la supervivencia de la bacteria esté comprometida, se puede producir un cambio en los patrones de expresión de muchas proteínas. Para que estos mecanismos adaptativos se hayan desarrollado, la bacteria debe haber estado en contacto frecuente con el estímulo estresante y haber sobrevivido al mismo. Entre los mecanismos conocidos de adaptación a estrés podremos citar la inducción de genes de respuesta a estrés salino, inducción de genes de respuesta a cambios de temperatura o inducción de genes de resistencia a tóxicos (antibióticos incluidos) que las bacterias encuentran a menudo en su hábitat. Como es lógico, se trata de mecanismos sometidos a estricta regulación, que sólo operan en caso de necesidad.

En su adaptación las bacterias pueden también recurrir a la adquisición horizontal de nuevos genes, que provienen de otros microorganismos (*véase el recuadro* “Origen y selección de genes de resistencia a los antibióticos”), o al cambio genético por mutación. La adquisición horizontal y la mutación permiten la adaptación rápida a ambientes donde se presentan cambios bruscos. Nos hallaríamos aquí ante la situación histórica de las bacterias patógenas que se encuentran repentinamente con un antibiótico.

Sabido es que, cuando se presenta una alta posibilidad de intercambio genético, los organismos tienden a adquirir genes que les permiten adaptarse al nuevo entorno. En las bacterias patógenas, cuyo nicho ecológico habitual es el paciente colonizado o infectado, el nuevo entorno, desde hace cincuenta años, viene representado por los antibióticos; en este caso necesitarán por tanto adquirir genes de resistencia a los antibióticos. Sin

La resistencia a los antibióticos

La infección por microorganismos ha sido, junto con el hambre, la causa principal de muerte en la especie humana. Incluso hoy, hemos de atribuir a las enfermedades infectocontagiosas la máxima responsabilidad de la mortalidad y morbilidad en nuestro planeta.

El descubrimiento de los antibióticos y su posterior utilización supusieron un salto importantísimo para el control de la infección. Sin duda, la aplicación de la terapia antiinfecciosa ha contribuido de un modo decisivo a la prolongación de la esperanza de vida. No sólo porque evita muertes por infección, sino también porque el desarrollo de nuevas terapias ya muy extendidas, pero que favorecen la infección (cirugías, intubación, inmunodepresión para trasplantes y terapia anticancerosa), serían impensables sin los antibióticos.

Desde hace un decenio, sin embargo, se ha venido asistiendo a un empeoramiento de la situación. La enorme presión selectiva producida por el uso de antibióticos, en clínica y en veterinaria, ha hecho que se seleccionen poblaciones bacterianas resistentes [*véase* “Desarrollo de resistencia contra los antibióticos”, por K. C. Nicolaou y Christopher N. Boddy, en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio 2001]. Esta situación, unida a la falta de interés en el desarrollo de nuevos antibióticos por parte de las compañías farmacéuticas (consecuencia de un excesivo optimismo en las cualidades de los medicamentos existentes y en la orientación hacia campos terapéuticos más rentables) ha provocado que haya infecciones que son muy difícilmente remediables mediante antibioterapia.

embargo, en algunos ambientes no existe posibilidad de adquirir genes de resistencia, ya sea porque no haya en dicho medio tales genes, ya sea porque la situación, las especies bacterianas implicadas o ambas no favorezcan la transferencia génica. Para adaptarse a un cambio ambiental tan drástico como es la presencia de antibióticos, sólo queda recurrir a la mutación.

Mutaciones y resistencia

Un antibiótico se considera eficaz o activo cuando alcanza su diana en una concentración suficiente como para poder inhibir el crecimiento bacteriano (*véase la figura 1*). Para lograrlo debe atravesar las distintas envueltas bacterianas, sufrir, en algunos casos, modificaciones provocadas por enzimas microbianas que permitan su activación y, por último, resistir la acción de mecanismos naturales de protección que, como las beta-lactamasas cromosómicas o los sistemas de bombeo múltiple de fármacos, están distribuidos ubicuamente entre los distintos géneros bacterianos.

Por consiguiente, las bacterias pueden hacerse resistentes a los antibióticos mediante mutaciones en genes que codifican la síntesis de proteínas implicadas en el transporte o activación del antibiótico, mutaciones en genes que codifican la síntesis de proteínas que participan en mecanismos de detoxificación y mutaciones en genes que codifican la síntesis de las dianas de los antibióticos.

Las mutaciones en genes que codifican la síntesis de proteínas implicadas en el transporte del antibiótico hacia el interior celular, o en su activación, harán que la concentración efectiva del fármaco en la célula sea más baja de lo que resulta necesario para la inhibición del crecimiento bacteriano.

En condiciones normales, las bacterias mantienen en suspenso la expresión de los genes que codifican la síntesis de proteínas implicadas en mecanismos de detoxificación. Por esa razón sólo presentan una resistencia baja, sin trascendencia clara desde un punto de vista clínico. Ahora bien, pueden aparecer mutaciones que produzcan que estos sistemas se expresen constitutivamente a un nivel muy elevado, de modo que las bacterias ofrezcan un grado importante de resistencia ante el tratamiento con antibióticos.

Por lo que concierne a los genes que codifican la síntesis de las dianas de los antibióticos, pueden aparecer mutaciones que cambien la estructura del efector en cuestión, con la pérdida consiguiente de la sensibilidad a los antibióticos mostrada con anterioridad.

Cuando se analizan las bacterias resistentes a los antibióticos, obtenidas a partir de pacientes tratados, se observan mutaciones en todos estos tipos de genes. En unas ocasiones, basta una sola mutación para conferir una resistencia plena; en otras, se requiere la presencia de varias mutaciones concurrentes, de modo que la bacteria muestre los niveles de resistencia necesarios para impedir su tratamiento por antibióticos. No obstante, hay un dato inequívoco: para cada nuevo antibiótico que se introduzca en el mercado, aparecerán indefectiblemente aislados resistentes a los antibióticos. Sólo es cuestión de tiempo.

Hemos visto que las mutaciones que dan lugar a la resistencia a los antibióticos se producen en genes que codifican la síntesis de transportadores, sistemas de detoxificación o proteínas importantes para la fisiología básica de las bacterias (las proteínas diana de los antibióticos). La estructura y la concentración bacteriana de estas proteínas se han optimizado a lo largo del tiempo evolutivo; significa ello que cualquier mutación que altere la secuencia génica implicada o sus niveles de expresión ejercerá un efecto negativo sobre el metabolismo microbiano y, por tanto, sobre su eficiencia ecológica para colonizar distintos ecosistemas.

Se ha comprobado que las mutaciones que confieren resistencia a los antibióticos conllevan a menudo una disminución de la capacidad de las bacterias para competir con sus compañeras sensibles. ¿Significa ello que, una vez desaparezca el antibiótico del medio, las bacterias sensibles, colonizadoras más eficaces, desplazarán a las resistentes? En absoluto. Se ha observado que, con frecuencia, las bacterias resistentes acumulan nuevas mutaciones que compensan el déficit fisiológico secundario a la mutación de resistencia. Pero se ignora si todas las mutaciones que potencialmente darían

lugar a resistencia a los antibióticos "se compensarían" con otra mutación. No sabemos todavía si hay mutaciones "prohibidas", cuyo defecto metabólico no se puede compensar. Este campo de investigación es objeto de un intenso debate.

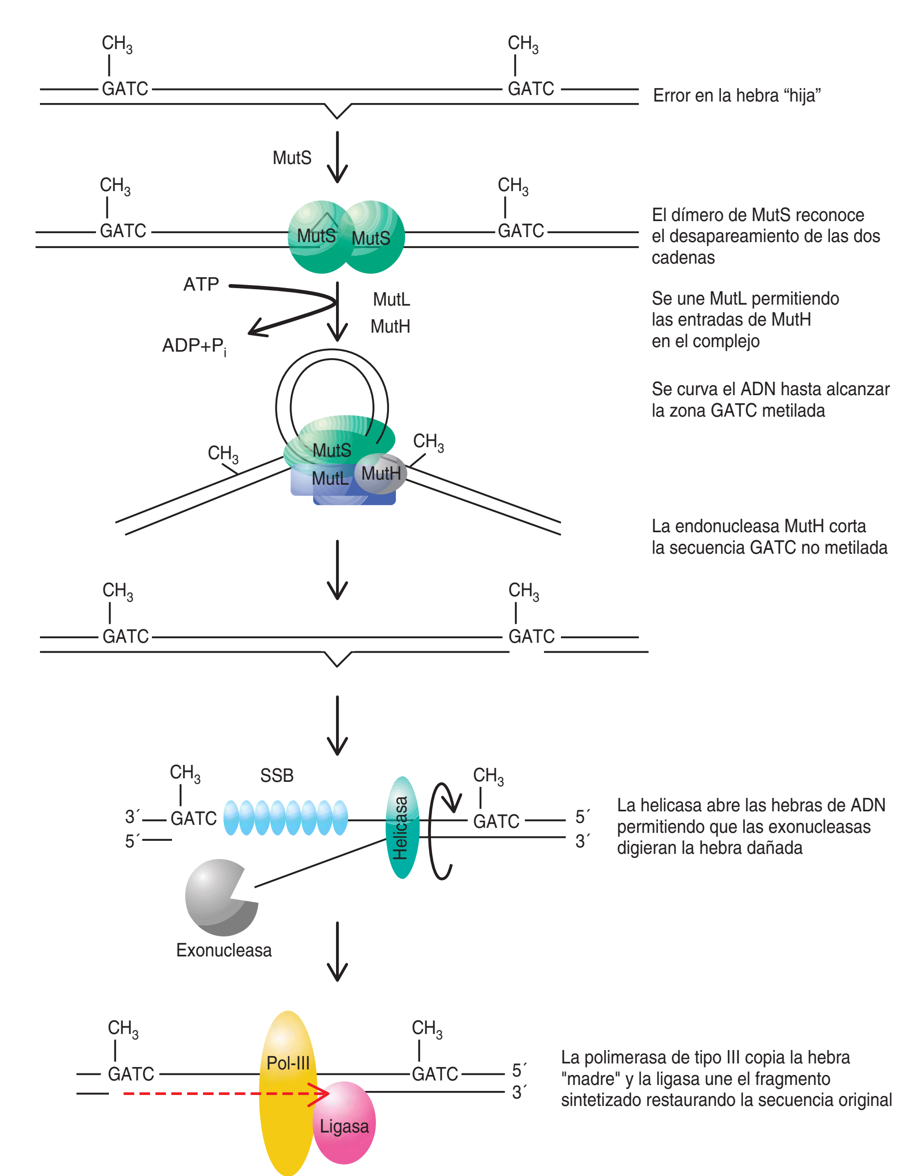
Mutación: ¿error útil o estrategia evolutiva?

Hasta hace poco los biólogos consideraban la mutación una consecuencia inevitable de los errores producidos durante la replicación del ADN, es decir, los errores introducidos por la ADN-polimerasa durante la copia del ADN cromosómico para originar dos cromosomas hijos. A esos errores había que sumar los producidos por lesiones, de origen físico o químico, en la molécula; ejemplo de agente físico sería la radiación ultravioleta y, de causa química, las especies reactivas de oxígeno o ciertos compuestos mutagénicos.

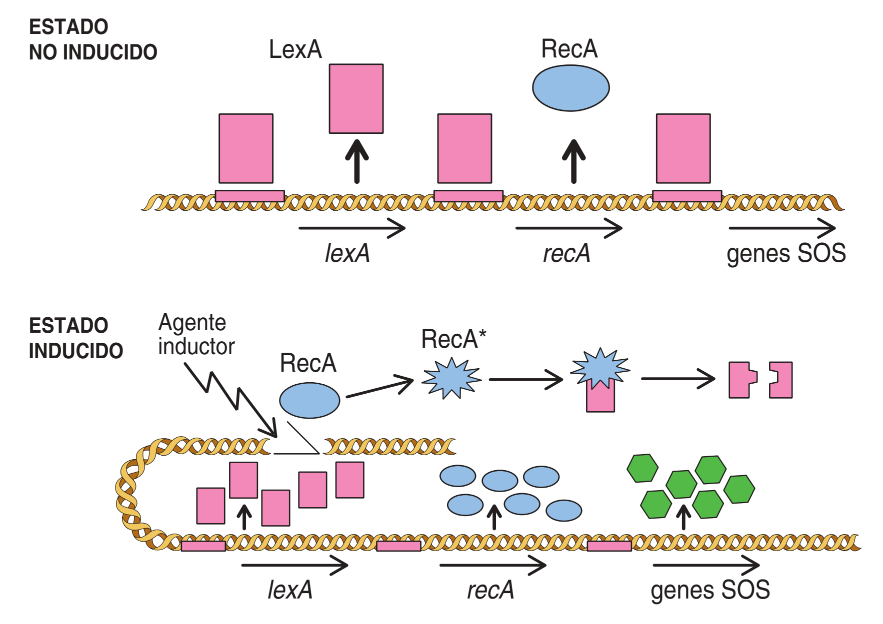
De acuerdo con ese planteamiento tradicional, no podrían enmendarse todos los errores del ADN, pese a que la célula dispone de mecanismos de corrección y reparación; la maquinaria no es perfecta. En dicho marco, la aparición de mutaciones al azar debida a los errores sería el combustible que alimentaría el motor de la evolución. La selección natural produciría la mezcla adecuada del combustible (cantidad de mutaciones al azar) para que el motor funcionara bien. Si hay demasiadas mutaciones, el motor evolutivo puede calentarse excesivamente y llegar a estallar; si no hay suficientes, el motor se para por falta de combustible.

Sin embargo, entre los biólogos que estudian la base molecular de la evolución se está abriendo paso una nueva idea: la selección natural ha privilegiado no sólo las mutaciones favorables, sino también la capacidad de evolucionar de los organismos, es decir, su adaptabilidad a distintos ecosistemas.

La adaptabilidad sería una consecuencia de la capacidad de generar mutantes que pueden desenvolverse en los nuevos ecosistemas. Cambia así el significado de la función biológica de la mutación: en lugar de un error útil, sería una estrategia evolutiva de adaptación. Llevando la situación



2. REPARACION DE MUTACIONES EN EL ADN. Si se producen cambios en el ADN por efecto de un mutágeno o por un error en la copia de la hebra del ADN, el sistema MDMRS puede detectar y corregir dichos errores. (MDMRS designa el sistema de reparación de malos emparejamientos dependiente de metilación del ADN.) El primer efecto del error consiste en un defecto en el emparejamiento de la cadena de ADN, que ha sufrido el cambio, con la cadena original. La proteína MutS, en forma de dímero, reconoce la presencia de una base mal emparejada y puede unirse a ella. Una vez se ha formado este complejo entre MutS y el ADN mal emparejado, se agregan dos monómeros de la proteína MutL a dicho complejo. Además de reconocer bases mal emparejadas, MutS se une inespecíficamente a una zona más amplia de ADN; se va produciendo así un bucle que concluye cuando el complejo formado encuentra una secuencia GATC. En este momento, la endonucleasa MutH corta la hebra no metilada (y, por tanto, la hebra "hija") de ADN cerca de dicho sitio GATC. Una vez se ha producido el corte, la helicasa II (producto del gen *uvrD*) desplaza la hebra que contiene la incisión, con lo que abre el camino a exonucleasas que degradan un número variable de nucleótidos. Mientras tanto, la hebra metilada (hebra "madre") queda protegida de la acción de nucleasas por la proteína SSB. El fragmento eliminado, que contenía la base desapareada, se sintetiza de nuevo, utilizando la hebra "madre" como molde, por la ADN-polimerasa III (replicasa) y conectado al resto de la hebra por la ADN-ligasa. De este modo el error queda reparado.



3. FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA SOS BACTERIANO. El sistema SOS regula la expresión de aproximadamente 40 genes bacterianos. En el estado no inducido, la expresión de estos genes se halla bloqueada en virtud de la unión del represor LexA a secuencias específicas localizadas en las zonas promotoras de los "genes SOS". La expresión de los genes *lexA* y *recA* se encuentra también reprimida por LexA. Si el ADN resulta dañado, se activa de inmediato el sistema SOS. El mecanismo consiste en una modificación de la proteína RecA que, en su estado activado (RecA*), hidroliza LexA. Una vez dejado inactivo LexA, no puede ejercer su efecto represor y se induce la transcripción de los distintos genes que componen el sistema SOS.

FERNANDO BAQUERO, JESUS BLAZQUEZ Y JOSE LUIS MARTINEZ

a su extremo, un organismo cuya replicación de ADN fuese perfecta, resultaría incapaz de mutar; por tanto, no evolucionaría y desaparecería con el primer cambio que se generara en el ambiente.

Aunque el nuevo planteamiento no altera la explicación darwinista de la evolución por selección natural, sí le añade una nueva dimensión: los organismos pueden influir en sus capacidades para evolucionar. Si la tasa de mutación es una magnitud importante para la evolución bacteriana, ¿cómo se seleccionarán las tasas de mutación más "adaptativas"?

Puesto que la mayoría de las mutaciones espontáneas son neutras o desfavorables, se ha esgrimido que la tasa de mutación debería haber evolucionado para ser lo más baja posible. Pero la variación resulta necesaria para la selección. Por tanto, la tasa de mutación deberá constituir una suerte de compromiso óptimo entre adaptación (y, por ende, ausencia de cambios) y adaptabilidad (es decir, la capacidad de generar modificaciones).

Desde un punto de vista evolutivo, podría revestir interés que las bacterias mantuvieran tasas de mutación bajas cuando no necesitaran cambiar y que las tasas de mutación aumentaran en situaciones de estrés que requieren la emergencia de nuevos fenotipos en la población; por ejemplo, resistencia a los antibióticos.

De hecho, se ha demostrado que las poblaciones bacterianas tienen subpoblaciones con tasas de mutación muy superiores a las habituales (hipermutadores), subpoblaciones que pueden aumentar su proporción en situaciones de estrés. A partir de simulaciones por ordenador se ha sugerido, en fecha reciente, que los alelos mutadores podrían desempeñar un papel importante en la evolución adaptativa, entendiendo por tal la evolución que permite adaptarse a ambientes nuevos o desfavorables. Al aumentar la posibilidad de aparición de mutaciones favorables, estos alelos acelerarían la tasa evolutiva. Durante el proceso, los hipermutadores pueden fijarse por asociación con las mutaciones favorables que ellos mismos han generado.

Uno de nuestros grupos (Baquero y Blázquez) ha demostrado que las condiciones que favorecen la selección de variantes hipermutadoras existen en los pulmones de pacientes fibrótico-quísticos infectados por *Pseudomonas aeruginosa*. La hipermutación en *Escherichia coli*, *Salmonella typhimurium* y *P. aeruginosa*, y probablemente en la mayoría de los microorganismos, se produce de manera principal por alteraciones en el sistema de reparación de malos emparejamientos dependiente de metilación del ADN (MDMRS, por "Methyl-Directed Mismatch Repair System"). Los genes afectados son, por orden de frecuencia, *mutS*, *mutL*, *mutH* y *mutU* (*uvrD*).

El sistema MDMRS, ampliamente estudiado en la bacteria *E. coli*, cuenta, entre sus principales misiones, la del reconocimiento y eliminación de bases introducidas erróneamente durante el proceso de replicación del ADN. Por culpa de tales errores se forman malos emparejamientos de dos bases no complementarias entre sí. ¿Cómo distingue el sistema la base errónea de la correcta? El ADN de muchos microorganismos, entre ellos *E. coli*, se encuentra metilado en la base adenina (A) de la secuencia GATC. Estos sitios de metilación se hallan distribuidos por todo el genoma bacteriano. Cuando el ADN se replica, se requiere cierto tiempo hasta que las nuevas hebras recién sintetizadas sufran metilación en sus secuencias GATC. En el curso de dicho intervalo, el sistema MDMRS puede discriminar entre la hebra nueva y la antigua. El sistema opera dando por descontado que el error se ha producido en la hebra recién sintetizada, la que no está metilada (*véase la figura 2*).

Como es lógico, las mutaciones que impidan el funcionamiento correcto del sistema MDMRS darán lugar a bacterias hipermutadoras. Ahora bien, en cuanto estrategia adaptativa la hipermutación estable representa un enorme coste energético y evolutivo para las bacterias. En teoría, una vez adaptadas a las nuevas condiciones (por ejemplo la presencia de antibióticos), las bacterias deberían recuperar su tasa

basal de mutación; de no hacerlo, quedarían expuestas a la extinción, dada la progresiva acumulación de mutaciones desfavorables.

Pero hay casos extremos en los que la supervivencia está en juego. Ocurre así cuando la presión selectiva es múltiple (en el caso de exposición a diferentes factores antimicrobianos del huésped, a diferentes antibióticos o a ambos), prolongada (en infecciones crónicas) y localizada (nichos dominados por un solo clon, en cuyo caso las posibilidades de adquisición de nuevas funciones mediante la incorporación de ADN por transferencia horizontal son muy bajas). En estos paisajes selectivos los microorganismos han de pagar el coste de mantener una alta tasa de mutación durante largos períodos de tiempo, si quieren conjurar el peligro de extinción.

Resultaría, por supuesto, menos costoso producir mutaciones sólo en aquellos genes cuya variación condujese a fenotipos potencialmente favorables. El sistema inmunitario nos ofrece un ejemplo claro. Los genes codificantes de anticuerpos mutan en sus regiones hipervariables con una frecuencia que supera un millón de veces la advertida en el resto del genoma. Las bacterias recurren a la misma estrategia para dirigir las mutaciones hacia algunos genes específicos que se hallan habitualmente sometidas a una fuerte presión selectiva, los llamados "genes de contingencia" [*véase* "Microsatélites de ADN", por Richard E. Moxon y Christopher Wills en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo 1999].

Se admite que los genes de contingencia codifican antígenos de superficie y sistemas de modificación/restricción, aunque probablemente queden por descubrir muchos más genes de este tipo. Se caracterizan por contener microsatélites, unas secuencias repetidas. Al encontrarse con estos motivos iterados, las polimerasas pueden "deslizarse" y, así, eliminar o añadir uno de ellos, alterando la secuencia del gen correspondiente. Los errores por deslizamiento acontecen en los microsatélites a una frecuencia que multiplica 10.000 veces la atribuida al resto, aunque son corregidos muy eficazmente por el sistema MDMRS. Por consiguiente, en cepas silvestres, y mucho más en cepas deficientes en el sistema MDMRS, los microsatélites incrementan la frecuencia de mutación de los genes que los contienen. La hipermutación en los genes de contingencia capacita, por lo menos a algunas bacterias de una determinada población, para adaptarse con presteza a nuevos ambientes.

ADN-mutasas bacterianas

Se reduciría también el coste de la mutagénesis mediante la intervención de sistemas que permitieran un incremento transitorio de la frecuencia de mutación tan sólo cuando fuera necesaria, es decir, en condiciones de estrés. A propósito de esta estrategia se ha descrito la existencia de polimerasas menos fieles de lo normal, que introducen más errores al copiar el ADN. La expresión de tales mutasas, en vez de las polimerasas habituales (esencialmente la ADN-polimerasa III), aumentará las tasas de mutación. El sistema SOS bacteriano (*véase la figura 3*), que se activa ante daños del ADN, constituiría un ejemplo claro de sistema mutador inducible, al ser capaz de activar genes codificantes de las mutasas *polB*, *umuC* o *dinB*.

La respuesta SOS en *E. coli* implica la acción de unos 40 genes regulados transcripcionalmente por la proteína represora LexA. Ante una lesión del ADN o una parada en la replicación de éste, se hidroliza el represor LexA en un proceso autocatalítico, mediado por la proteína RecA* (la forma activada de RecA), activando la expresión de los distintos genes del sistema SOS. Muchas de las proteínas inducidas tempranamente en la respuesta SOS intervienen en rutas de reparación que no producen un incremento de mutaciones sobre los niveles normales.

Sabemos que la inducción del sistema SOS se acompaña de un incremento en el número de mutaciones. En la respuesta SOS entran en acción unos 40 genes, de cuyos productos sólo las proteínas codificadas por los genes *polB*, *dinB*

Origen y selección de genes de resistencia a los antibióticos

En muchos casos, las bacterias pueden hacerse resistentes a los antibióticos porque adquieren, de otras bacterias, genes capaces de inactivar los antimicrobianos. Ahora bien, si los antibióticos no se introdujeron hasta el último medio siglo, ¿de dónde provienen estos genes de resistencia? ¿Cuál era su función original?

Durante mucho tiempo, la hipótesis más aceptada establecía que los genes de resistencia a los antibióticos provenían de los microorganismos productores de los mismos. En efecto, la mayoría de los antibióticos utilizados en clínica son sintetizados por microorganismos naturales. Si éstos producen antibióticos, deberán tener sistemas que les sirvan para defenderse de los mismos; si no fuera así, morirían. Pues bien, estos sistemas serían los que están codificados por los genes de resistencia a los antibióticos, y su adquisición por las bacterias patógenas dotaría a éstas de resistencia contra los antibióticos.

Hoy se ha abierto camino otra concepción del fenómeno. A tenor de la misma, situar el origen de los genes de resistencia a los antibióticos en los propios organismos productores sería verdad, pero no toda la verdad. Se hallarían también implicados en la resistencia otros genes que intervienen en procesos biosintéticos, de detoxificación o de señalización celular. Tal convergencia vendría determinada por las semejanzas estructurales entre los antibióticos y otras moléculas que participan en el metabolismo microbiano. Los sistemas que modifican estos metabolitos alterarán, por tanto, los antibióticos, y los genes que los codifican serán genes de resistencia a los antibióticos.

y *umuC*, además de *recA*, parecen implicados en los procesos de mutagénesis inducida en *E. coli*. Las proteínas codificadas por estos tres genes son ADN-polimerasas (ADN-polimerasas II, IV y V respectivamente) que provocan mutaciones bajo determinadas circunstancias; de ahí el nombre de mutasas. A modo de ejemplo, la sobreexpresión de *dinB* resulta en un incremento de unas 1000 veces en la tasa de mutación.

Según se indicó antes, las mutaciones en el ADN se originan durante la replicación y se deben a errores del propio proceso replicador o a mutágenos físicos y químicos. Estos agentes mutagénicos cambian la estructura de algunas bases del ADN y pueden bloquear la replicación. Según parece, es en ese momento cuando entran en juego las ADN-polimerasas II, IV y V.

Cumple a estas polimerasas continuar la síntesis de ADN a través de las lesiones sufridas: "síntesis a través de lesión", así se llama el proceso. No obstante, una vez presentes en gran cantidad, tales enzimas pueden también realizar su trabajo de síntesis de ADN en sitios sin lesión. Por tener que habérselas con una lesión no corregida, se trata de un proceso menos fiel que la replicación normal. Ello comporta un aumento de errores en la síntesis de la nueva hebra de ADN y, por consiguiente, un incremento de mutaciones. Se ha sugerido, además, que estas polimerasas podrían ser menos fieles que las bacterianas habituales y que esa menor fidelidad en la copia podría constituir una de las causas de hipermutación.

Cada una de estas enzimas produce cambios en el ADN, vinculados al tipo de lesión o error que se haya introducido. Sin embargo, muchas de las mutaciones inducidas por la actividad de las ADN-polimerasas II, IV y V son susceptibles de reparación por el sistema MDMRS.

Por consiguiente, si sumamos los dos sistemas posibles de generación de hipermutación (inducción de mutasas y defectos en el sistema MDMRS), se multiplicará el número de mutaciones debidas a la acción de mutasas, dado que la bacteria, defectiva en MDMRS, será incapaz de reparar las mismas.

Los antibióticos, inductores de mutación

Se venía considerando a los antibióticos como meros selectores de cepas bacterianas resistentes. En ese marco, el tratamiento antibiótico eliminaría las bacterias sensibles; sólo sobrevivirían las que, por azar, hubieran adquirido una mutación o un gen de resistencia, desarrollándose y dando lugar a una población exclusiva de bacterias resistentes.

Pero el panorama se nos ofrece más complejo. Se ha demostrado que, con la selección de bacterias resistentes por los antibióticos, se registra, en paralelo, un incremento ingente de la proporción de cepas mutadoras con una tasa de mutación entre 100 y 1000 veces superior a la población normal. Se pasa, tras el tratamiento, del 1/1.000.000 al 1/100 o incluso al 100 % de cepas mutadoras, dependiendo del número de selecciones. La mayoría de estos mutadores contienen mutaciones que inactivan alguno de los genes del sistema MDMR, con la brusca merma consiguiente de la capacidad de la célula bacteriana para corregir los errores aparecidos en la replicación de su ADN. Por lo tanto, un antibiótico no sólo selecciona los individuos resistentes al mismo, sino que, por un proceso de "selección de segundo orden", prima a los individuos mutadores y, por tanto, más aptos para adquirir resistencia a otros antibióticos.

Para complicar las cosas, en los últimos años se han acumulado pruebas de que algunos tipos de antibióticos, además de seleccionar las cepas resistentes existentes en la población y aumentar la proporción de mutadores, pueden incrementar transitoriamente el número de mutaciones que se producen en las células bacterianas, lo que conduce a un aumento en el número de individuos resistentes a dicho antibiótico. Por ejemplo, las quinolonas, una de las familias de antibióticos más usada en los tratamientos de infecciones bacterianas, producen una parada en la replicación del ADN al actuar sobre una de las proteínas esenciales en este proceso, la ADN-girasa. Esta parada induce el sistema SOS bacteriano y, consecuentemente, la síntesis de mutasas. Como resultado, se multiplicará el número de mutaciones y también las posibilidades de adquirir resistencia por modificación (mutación) en la diana del antibiótico (ADN-girasa).

Los resultados obtenidos por uno de nuestros laboratorios (Martínez) y por otros grupos indican que otros antibióticos (por ejemplo, aminoglicósidos o tetraciclina) incrementan, a su vez, el número de mutaciones, aunque operan a través de un mecanismo distinto. Por último, de acuerdo con las investigaciones realizadas en el laboratorio de Blázquez y Baquero, los antibióticos beta-lactámicos, aunque no lesionan el ADN, sí inducen la síntesis de la mutasa ADN-polimerasa IV. Como era de esperar, el tratamiento con beta-lactámicos incrementa la tasa de mutación entre 10 y 100 veces en las bacterias sometidas a dichos antibióticos, con el riesgo añadido de que la aparición de bacterias resistentes esté favorecida por el efecto selectivo derivado de la presencia del propio antibiótico.

En resumen, los antibióticos no son meros selectores de cepas resistentes. Mediante un proceso en el que las bacterias participan activamente, son capaces de incrementar, estable o transitoriamente, la tasa de mutación de las mismas, acelerando la variabilidad genética y aumentando, por tanto, las posibilidades de adquisición de resistencia.

Bibliografía complementaria

ENZYMES OF EVOLUTIONARY CHANGE. Miroslav Radman, en *Nature*, vol. 401, págs. 866-867; 1999.

HIGH FREQUENCY OF HYPERMUTABLE *PSEUDOMONAS AERUGINOSA* IN CYSTIC FIBROSIS LUNG INFECTION. Antonio Oliver, Rafael Cantón, Pilar Campo, Fernando Baquero y Jesús Blázquez, en *Science*, vol. 288, págs. 1251-1253; 2000.

MUTATION FREQUENCIES AND ANTIBIOTIC RESISTANCE. José Luis Martínez y Fernando Baquero, en *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, vol. 44, págs. 1771-1777, 2000.

Patrick David

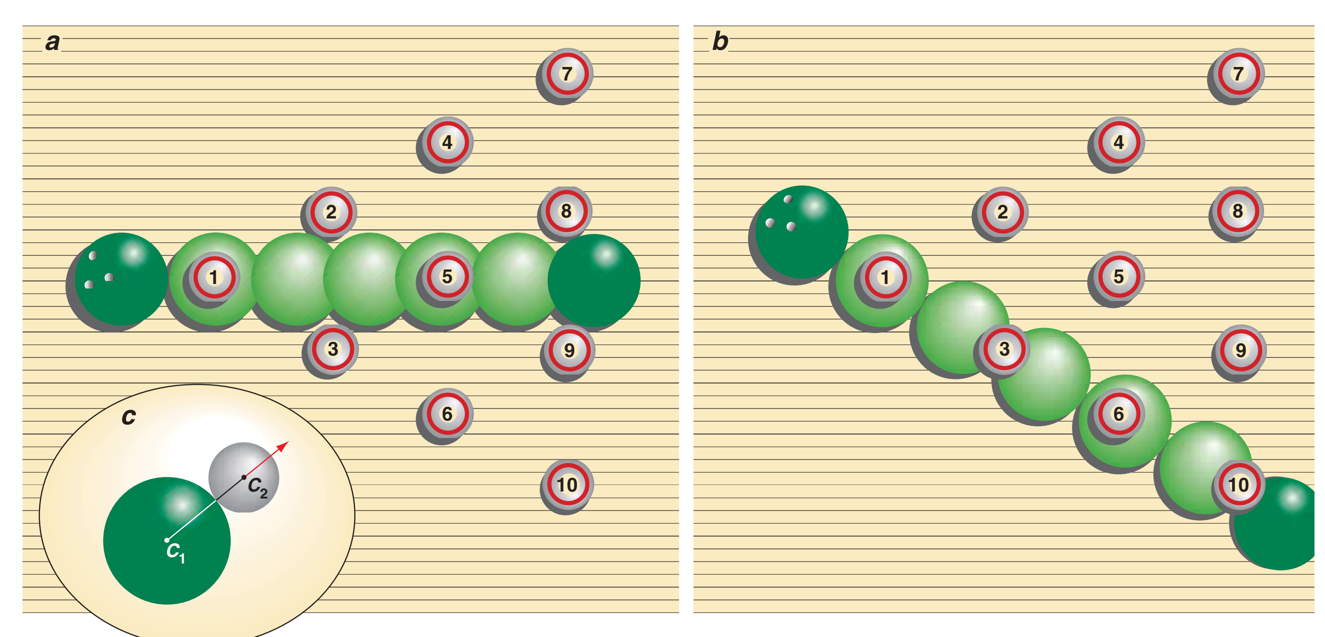
Pleno en la bolera

El sueño de cada jugador de *bowling*, versión americana del juego de los bolos, es el "pleno" o strike, el lanzamiento que derriba los diez bolos. Hay innumerables formas de conseguir este objetivo, entre ellas algunas muy raras, que en gran medida son producto de la casualidad. El jugador, que codicia una cantidad de puntos elevada, no se cebará en conseguir lanzamientos azarosos, sino que intentará perfeccionar su técnica de tal manera que pueda controlar el resultado: mejor derribar siempre todos los bolos de la misma y aburrida manera que dejarlos cada vez en pie tras nuevos lanzamientos llenos de fantasía. Y hasta ese objetivo más modesto es casi imposible: los jugadores profesionales sólo aspiran a conseguir un "semipleno" o *spare* por turno, es decir, derribar todos los bolos en dos lanzamientos. Para ellos el *strike* resulta una feliz —y frecuente— coincidencia; para los aficionados, un regalo del cielo.

Un pleno es un compromiso entre objetivos difíciles de conciliar. Los diez bolos tienen un diámetro máximo de 12,1 centímetros. Nueve de ellos están situados en los lados de un triángulo equilátero y el décimo, justo en el centro. La distancia de uno a otro es siempre de 30,48 centímetros. Si el jugador lanza la bola de 21,6 centímetros de diámetro por el centro, por la línea que une los bolos 1 y 5, no acertará en ningún caso a los bolos laterales 4, 6, 7 y 10 (*véase la figura 1*). ¿Debería mejor dar al primer bolo con un ángulo de 30 grados, ya que así recorrería la bola todo un lado del triángulo? ¡De ninguna manera! Este recorrido sería óptimo si no hubiera otros bolos. Como la bola acierta a su víctima justo en medio, no se desviará de su trayectoria y sólo derribará los bolos 1, 3, 6 y 10. Se trata de derribar a los bolos, pero no con un choque central, para que la bola se desplace un tanto en zigzag. De esa manera —digamos— se derribarán directamente los bolos 1, 3 y 5, que arrastrarán, en su caída oblicua, a los restantes. Para que la bola se desvíe en tal medida, debe moverse, llegado el momento, suficientemente despacio. Así que hay que conseguir una habilidosa combinación de velocidad y de punto y ángulo de impacto.

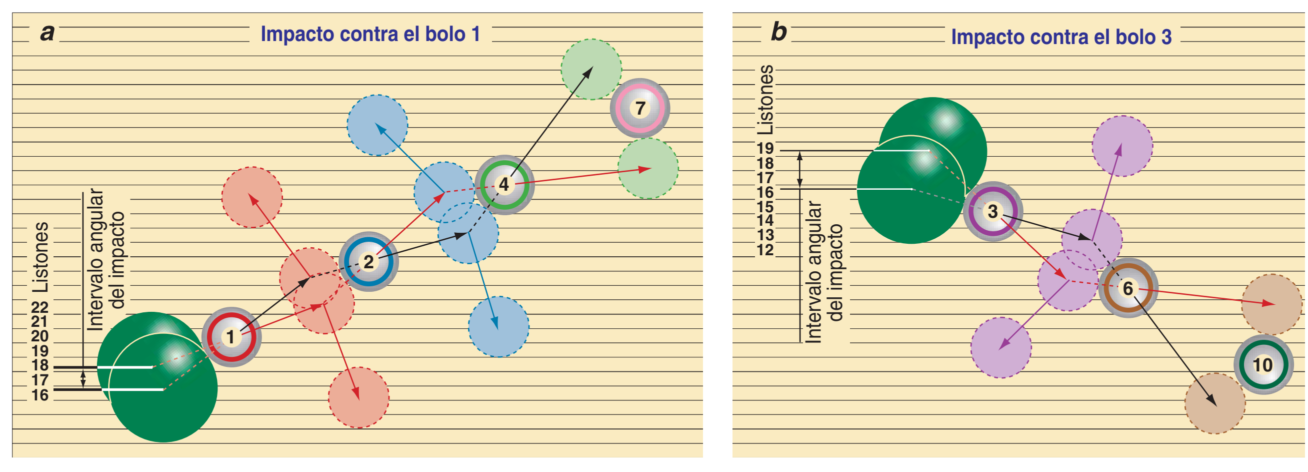
Geometría del pleno

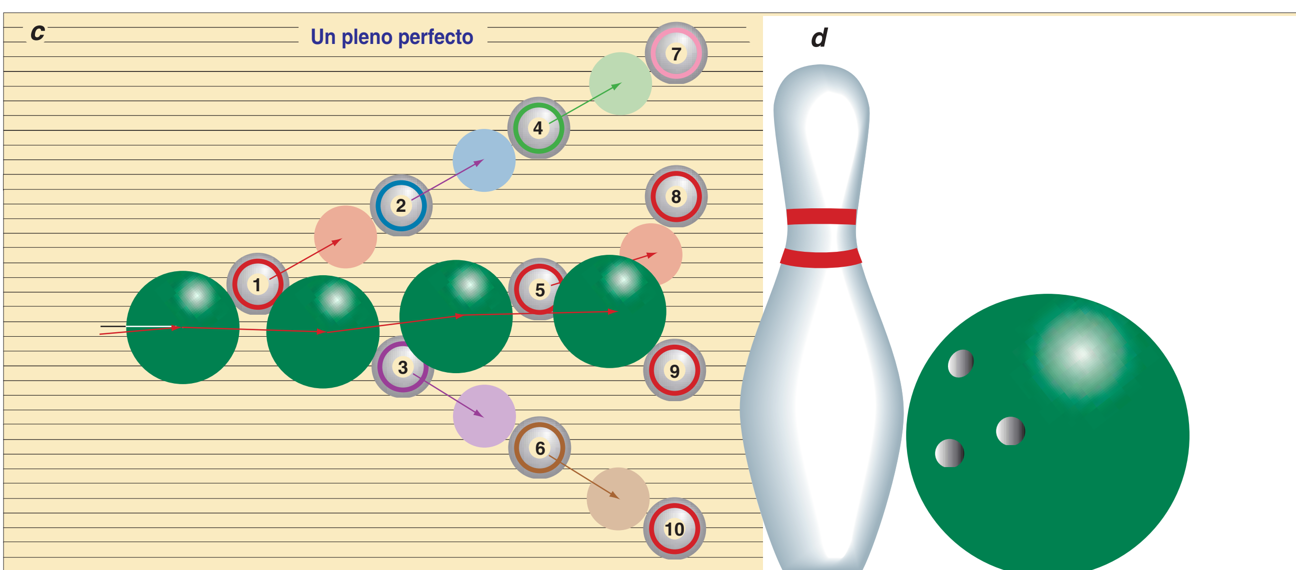
Si un objeto en movimiento con simetría rotacional impacta contra otro que está quieto, también con simetría rotacional, este segundo se pondrá en movimiento a lo largo de la línea de unión entre ambos centros, sea cual sea la dirección del movimiento del primero (*véase la figura 1c*). Para que el bolo 1 al caer arrastre consigo al bolo 2 y a continuación caigan el 4 y el 7, la bola debe dar al primer bolo dentro de un intervalo angular de 17 grados (*véase la figura 2 a*). Para el derribo de la serie 3, 6, 10 el intervalo angular es de 25 grados



1. En la bolera americana, los diez bolos (pins) están dispuestos en los lados de un triángulo equilátero y en su centro. Un bolo alcanzado cae en la dirección de la línea que une los puntos medios de la bola y el bolo (c). Un lanzamiento central perfecto derriba sólo los bolos 1, 2, 3, 5, 8 y 9 (a); un lanzamiento a lo largo de un lado del triángulo sólo derriba los bolos de este lado (b)

POUR LA SCIENCE





2. La bola debe derribar el bolo 1 de tal manera que una reacción en cadena arrastre la caída de los bolos 2, 4 y 7. Para ello tiene que incidir en él dentro del intervalo angular que se muestra (a). *Para la diana siguiente, con la que derribará el bolo 3 (cuya caída provocará la de los 6 y 10), el intervalo es algo mayor* (b). *La bola derriba a continuación el bolo 5 (que se lleva por delante al 8) y finalmente el 9* (c). *Una bola de bowling acierta siempre al bolo un poco por debajo de la línea de máximo grosor* (d)

(*b*). Finalmente, para que el bolo 5 pueda derribar al 8, la bola tiene que golpearlo con un ángulo de 44 grados. En un *strike* perfecto (*c*) sólo se tiran directamente cuatro bolos, los 1, 3, 5 y 9; todos los demás caen víctimas de sus compañeros de formación.

Reflexiones teóricas de este tipo, corroboradas por la práctica, proporcionan unas directivas para el *strike* ideal. Se refieren a una pista con 39 listones paralelos, que numeramos de derecha a izquierda (el listón 20 está en medio de la pista), a una bola de 7,5 kilogramos y a un jugador que lance con la mano derecha.

En el momento del impacto con el bolo 1 tiene que

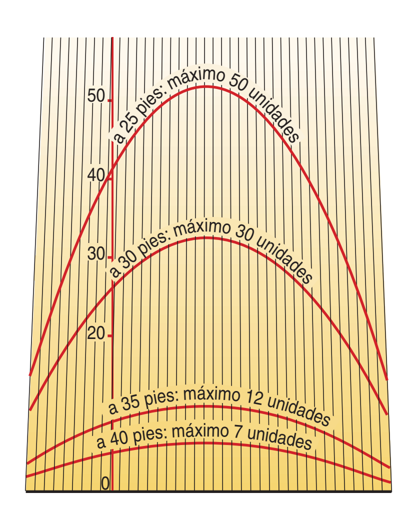
- encontrarse el centro de la bola en la línea de separación entre los listones 16 y 17,
- formar el vector de su velocidad con el eje longitudinal de la pista un ángulo entre 6 y 8,5 grados, y
- ser su velocidad de al menos 6 metros por segundo.

Pero, ¿cómo se puede conseguir ese ángulo de al menos 6 grados? Si el jugador pone en movimiento la bola desde el extremo derecho y apunta en línea recta al listón diecisiete, no conseguirá más que 1,5 grados. En todo caso, el primer bolo está 60,5 pies (18,44 metros) más allá de la línea de penalización que el jugador no debe traspasar y la pista tan sólo tiene 41,5 pulgadas (1,05 metros) de anchura. Así que no nos ayuda nada: a la bola hay que darle una trayectoria curva.

Un curvarse elegante

Quien observe a un buen jugador, se dará cuenta de que lanza la bola hacia la orilla —una aberración para el principiante—. Sin embargo, en el último tercio de la pista la trayectoria se curva, describe un "gancho" y derriba al primer bolo con el ángulo correcto (*véase la figura 4*). Esa curvatura se debe a la rotación de la bola.

Los primeros dos tercios de la pista están lubrificados. En esa parte de su camino la bola se mueve en línea recta casi. Gira sobre su eje, pero debido a la poca fricción con la superficie de la pista ésta no influye

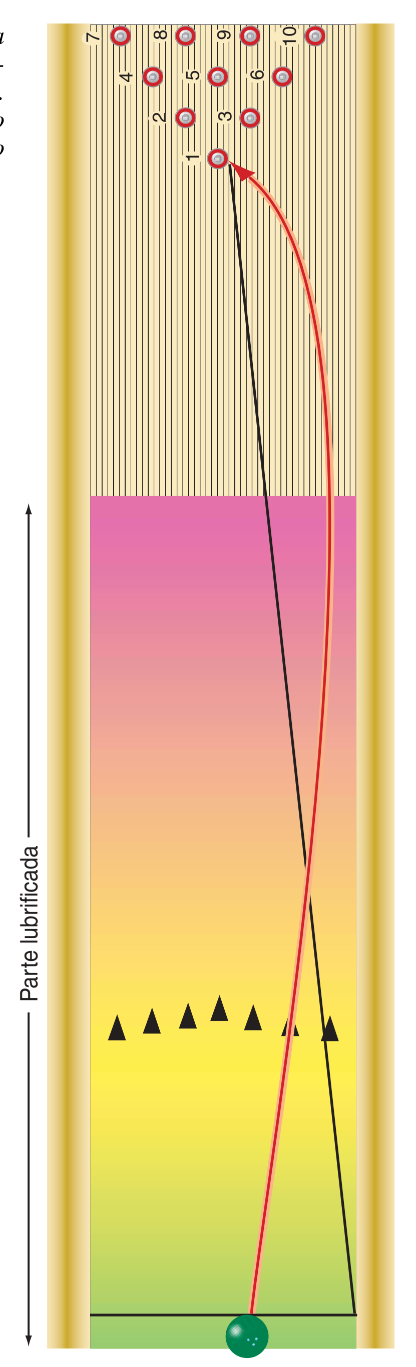


3. El grosor de la capa de aceite sobre la pista disminuye del centro hacia los lados y desde la línea de penalización hasta los bolos. El último tercio de la pista está seco. El grosor se mide en "unidades"; 300 unidades corresponden al grosor de un billete

en su movimiento de traslación, igual que las ruedas de un coche que circula sobre una superficie helada no modifican el estado de movimiento del vehículo. En la parte sin lubrificar, en cuanto la fricción hace efecto, la rotación de la bola alrededor de un eje inclinado con respecto a la perpendicular a la pista tuerce la trayectoria de la bola, lo mismo que el girar de las ruedas del coche cambia la dirección en que avanza.

Eje y velocidad de rotación quedarán determinados por el lanzamiento. Según como despida el jugador la bola de su mano, su eje de rotación estará más o menos inclinado, resbalará más o menos en la película de aceite y al final se torcerá en mayor o en menor medida su camino. La bola, además, no es homogénea: la distribución desigual de la masa, debido a la perforación de los agujeros de sujeción, se compensa, pero no del todo, con un pesado núcleo excéntrico. Dependiendo de la descompensación residual, bolas diferentes se comportarán quizá de manera totalmente distinta sobre la pista.

Para facilitar el objetivo, a 15 pies de la línea de penalización (4,57 metros) cada quinto listón lleva marcado un triángulo. Los jugadores experimentados se orientan más con estas miras que con los bolos lejanos.



4. Los primeros dos tercios de una pista de la bolera están lubrificados; los triángulos negros sirven de miras auxiliares. La bola sólo alcanza el primer bolo con el ángulo de incidencia adecuado si sigue un camino curvo

La unción final

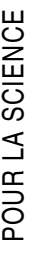
La capa de aceite que unta la pista protege el material de los golpes de las bolas lanzadas y las hace resbalar suficiente trecho sin que pierdan energía antes de tiempo. En el centro de la pista, el grosor de la capa de aceite es constante hasta 26 pies (7,93 metros) más allá de la línea de penalización; disminuye uniformemente hasta los 40 pies (12, 19 metros, dos tercios de la longitud de la pista). Hacia ambos lados de la pista la capa de aceite va disminuyendo por igual. ("Aceite en corona" se llama a esta distribución.)

El jugador se puede valer de esta manera de aplicar el aceite para dirigir el camino de la bola con precisión. Resbala mejor, claro está, cuanto más espesa sea la capa de aceite. Una bola que corra cerca de una de las orillas llegará antes a terreno más seco y, por tanto, empezará a curvarse lejos aún del objetivo. Por el contrario, una bola lanzada por en medio empezará a trazar el gancho más tarde.

Mientras la bola resbale sobre una cantidad grande de aceite, su eje de rotación no será, por lo general, perpendicular a la dirección del desplazamiento, como sí ocurriría en una rodadura; por otra parte, la "faja" de aceite que va adquiriendo mientras resbala será oblicua a la dirección en que se mueva. Esta oblicuidad descompone la fuerza de fricción entre la bola y la pista, que se hace palpable cuando la capa de aceite disminuye, en dos componentes: una, paralela a la faja, acelera la rotación de la bola alrededor de su eje; la otra, perpendicular a la anterior, desvía la bola; debido al efecto giroscópico, hace que el eje de rotación gire alrededor de la vertical. Con ello vira la dirección del movimiento paulatinamente hacia la dirección de la faja. Finalmente la bola rueda, sin resbalar, según su nueva dirección.

Habiendo llegado a su objetivo, la bola debería tener aún suficiente energía de movimiento como para proporcionar una buena parte de ésta a los bolos. ¡Pero no demasiada! El choque con el primer bolo debe posibilitarle el desvío hacia el siguiente.

Con una pista y una lubrificación dadas —que el jugador puede inspeccionar previamente—, el arte consiste en escoger la bola correcta y los parámetros de lanzamiento adecuados. Si usted ha leído hasta aquí, sabrá más de la teoría que la inmensa mayoría de jugadores. "Sólo" le falta la práctica.



Juan M. R. Parrondo

La misteriosa ley del primer dígito

La ley del primer dígito, también conocida como *ley de Benford*, es un fenómeno matemático sorprendente, casi mágico, que revela una cierta universalidad en los aspectos cuantitativos del mundo, una propiedad común a series de datos que provienen de fuentes muy diversas.

Para entenderla es mejor relatar cómo fue descubierta. El descubridor de la "ley" no fue Benford, sino un matemático y astrónomo del siglo XIX llamado Newcomb. En 1880 no existían calculadoras ni ordenadores, pero los científicos e ingenieros realizaban cálculos complejos gracias a los logaritmos. Para multiplicar dos números, por ejemplo, basta averiguar sus logaritmos, sumarlos y encontrar el *antilogaritmo* de esta suma. Por ello, los científicos consultaban constantemente las *tablas de logaritmos*. Las tablas son como un diccionario en el que las entradas fuesen números ordenados, no de menor a mayor, sino de forma parecida a la alfabética: primero los que comienzan por 1, luego los que comienzan por 2, y así sucesivamente.

Newcomb se dio cuenta de que las primeras páginas de las tablas de la biblioteca de su facultad estaban mucho más sucias y manoseadas que las últimas. ¿Quizás en su facultad era más corriente consultar el logaritmo de los números que comienzan por 1 y por 2 que el de aquellos que comienzan por 9? Fue a la biblioteca de una facultad diferente a la suya, a escuelas de ingenieros, de matemáticos, de físicos, de astrónomos,... y el resultado fue el mismo: los números que comienzan por 1 eran más consultados que los que comienzan por 9.

El propio Newcomb encontró, mediante un argumento poco riguroso, una fórmula para la probabilidad de que un número en una serie de datos comience por el dígito d. La fórmula es:

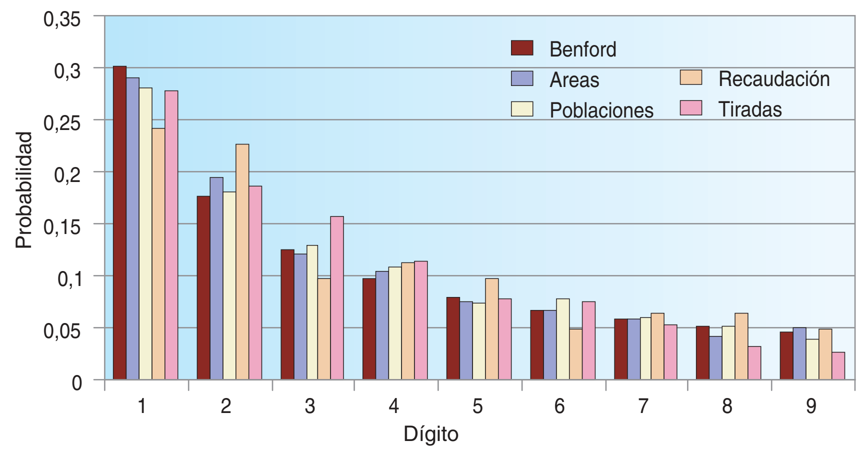
$$p_d = \log_{10}(1 + 1/d)$$

Utilizando esta fórmula se encuentra que, para $d = 1$ la probabilidad es, aproximadamente, del 30 %, para $d = 2$ del 17,6 %, para $d = 3$ del 12,5 %, para $d = 4$ del 9,7 %, para $d = 5$ del 7,9 %, para $d = 6$ del 6,7 %, para $d = 7$ del 5,8 %, para $d = 8$ del 5,1 % y para $d = 9$ del 4,6 %.

La observación de Newcomb no tuvo demasiada repercusión hasta que otro matemático, Frank Benford, publicó en 1932 un artículo con más de 20.000 números extraídos de multitud de fuentes: áreas de ríos, poblaciones de ciudades, números que aparecen en la primera página de los periódicos, constantes físicas, pesos atómicos... Contó con paciencia el primer dígito de todos esos datos, calculó las probabilidades para cada dígito y demostró que la mayoría de estos conjuntos de datos verifican la fórmula de Newcomb. Por eso ahora conocemos la ley con el nombre de Benford.

Sin embargo, obviamente hay conjuntos de números o de datos que no verifican la ley: en los números que han salido en la lotería todos los dígitos deben tener una probabilidad del 10 %; los pesos en kilogramos de los europeos adultos se encuentran alrededor de 80 kilogramos y por tanto el 8, el 7 y el 9 serán mucho más probables que el 2 o el 3.

Entonces, ¿qué datos verifican la ley de Benford? La respuesta no está muy clara. Por eso entrecomillo la palabra "ley". No hay una caracterización precisa de las series de datos que verifican la ley, pero lo cierto, y lo sorprendente, es que la mayoría de los datos que se pueden extraer de fenómenos naturales, sociales y económicos sí la verifican. Yo mismo he comprobado la ley para datos que provienen de fuentes muy diversas: el área y la población de los países del mundo, la recaudación de las taquillas de los cines de cada provincia de España durante 1997, y la tirada de las revistas y periódicos de nuestro país también durante 1997. Aunque hay algunas discrepancias, el acuerdo es impresionante, sobre todo teniendo en cuenta el origen tan variado de los datos. De hecho, las cuatro series que se presentan en la figura se escogieron completamente



La frecuencia del primer dígito de varias series de datos comparadas con la ley de Benford. Las series de datos son: áreas y poblaciones de 242 países del mundo, recaudación de los cines de 62 provincias y comunidades autónomas y tirada de 413 publicaciones

al azar de varias bases de datos que tenía a mi disposición a través de Internet o de anuarios de periódicos en formato digital.

¿Cómo es posible que datos tan distintos compartan esta extraña propiedad? Aunque no definitiva, una de las respuestas más convincentes se basa en la llamada *invariancia bajo cambio de escala* o *autosimilaridad*.

Imagine que el tamaño de su cuerpo se reduce a la mitad, como si usted se reencarnara en el protagonista de *El increíble hombre menguante*. La altura de sillas y mesas y el tamaño de cualquier objeto se multiplicaría por dos y, como consecuencia, su vida cotidiana resultaría bastante más difícil. No hay ninguna duda de que el mundo no sería el mismo si todas las longitudes (salvo, claro está, las dimensiones del observador) se multiplicasen (o se dividiesen) por dos. Sin embargo, en ciertos casos, en ciertos "mundos", no ocurre así. Si algo no cambia cuando las distancias se multiplican por dos (o por otra cantidad), decimos que es *autosimilar* o *invariante bajo cambio de escala*. También decimos que es un *fractal*. Aunque no lo parezca, hay muchos fractales en la naturaleza, sobre todo en formaciones geológicas, en fenómenos relacionados con fluidos, en seres vivos y en sistemas sociales y económicos.

¿Qué tienen que ver los fractales con la ley de Benford? Imagine un "mundo fractal", un mundo que no cambia si las distancias se multiplican por dos. Si recogemos datos que corresponden a longitudes, la distribución de estos datos tiene que ser la misma si los multiplicamos por dos. O, para expresarlo de forma más sencilla, si escribimos una tabla con esos datos y otra tabla con esos mismos datos multiplicados por dos, las dos tablas tienen que ser prácticamente indistinguibles. Por supuesto, no pueden ser completamente indistinguibles, ya que si la primera tabla comprende números entre uno y diez mil, la segunda comprenderá números entre dos y veinte mil. Pero lo importante es que la parte central de ambas tablas tiene que ser similar si, como hemos supuesto, los datos provienen de un objeto fractal.

Ahora bien, los números que empiezan por 1 en la primera tabla empezarán por 2 y por 3 en la segunda; los que empiezan por 2, en la segunda tabla empezarán por 4 y 5, y así sucesivamente. Los que empiezan por 5, 6, 7, 8 y 9 en la primera tabla, tendrán que empezar por 1 en la segunda. Como las dos tablas son indistinguibles, llegamos a la conclusión de que las probabilidades p_d de que el primer dígito de los datos sea d deben verificar:

$$p_1 = p_2 + p_3$$
$$p_2 = p_4 + p_5$$
$$p_3 = p_6 + p_7$$
$$p_4 = p_8 + p_9$$
$$p_5 + p_6 + p_7 + p_8 + p_9 = p_1$$

El lector puede comprobar que las probabilidades dadas por la ley de Benford cumplen estas cinco ecuaciones y, repitiendo el argumento con otros factores distintos de dos, se puede comprobar que la ley de Benford es la única completamente invariante bajo cambios de escala arbitrarios.

Si este argumento es el verdadero origen de la ley de Benford, entonces la ley nos estaría indicando que la autosimilaridad es ubicua en la naturaleza y en los fenómenos sociales y económicos. Una de las razones de esta posible ubicuidad es que la autosimilaridad aparece cuando no hay una *magnitud característica* en un sistema. Por ejemplo, en las leyes que rigen la formación de paisajes geológicos, no parece que haya ninguna escala de longitud relevante y por ello dichos paisajes suelen ser autosimilares. Del mismo modo, uno podría decir que no hay una cantidad de lectores característica en la prensa de nuestro país y por ello la tirada de las revistas y periódicos es autosimilar, como indica la figura. Sin embargo, todas estas explicaciones están lejos de ser satisfactorias.

Independientemente de cuál sea su origen, algunos investigadores han intentado encontrar aplicaciones a la ley de Benford. Mark Nigrini propuso, en su tesis doctoral de 1992, utilizar la ley para detectar fraudes fiscales o contables, suponiendo que los números de una declaración fraudulenta no siguen la ley de Benford, mientras que los de una declaración honrada sí lo hacen. El método, que Nigrini denomina *análisis digital* (aunque crearía menos confusión llamarlo *análisis de dígitos*), se ha empleado en varias ocasiones y ya ha sido útil para "pescar" a más de un defraudador. El método descubrió, por ejemplo, que una ejecutiva de una cadena de moteles en Estados Unidos estaba firmando cheques para pagar falsas operaciones de corazón. Por supuesto, una vez que la ley de Benford sea conocida por los posibles defraudadores, el análisis digital servirá de muy poco.

Otra aplicación de la ley de Benford ha sido sugerida por uno de los más conocidos expertos en programación informática: Donald Knuth. La idea de Knuth es que un ordenador tiene que manejar datos que probablemente sigan la ley de Benford. Por tanto, podríamos diseñar ordenadores que sean más rápidos calculando o leyendo de discos duros y memorias RAM aquellos números que empiezan por 1.

Alguien podría haber sugerido en el siglo XIX que las páginas de las tablas logarítmicas correspondientes a números que empiezan por 1 fueran más robustas y se accediera más fácilmente a ellas. Curiosamente, la propuesta de Knuth no es más que una versión moderna de esta idea.

Algunos lectores me han hecho notar que la relación entre el problema de la moneda falsa y la teoría de la información (*véase* Juegos matemáticos de octubre de 2002) ha sido tratada por Juan Domínguez en un artículo de la revista *Qüestió* (junio de 1983). Domínguez relaciona el problema con el de la búsqueda de bits erróneos en un mensaje, y hace notar que con tres pesadas se puede detectar la moneda falsa en un conjunto de 12 incluso añadiendo la posibilidad de que ninguna de las monedas sea falsa. Con ello el número total de posibilidades es $12 \times 2 + 1 = 25$, aún menor que el número de posibles resultados, que es $3 \times 3 \times 3 = 27$. Finalmente, el número de pesadas necesarias para resolver el problema con n monedas debe ser mayor que el logaritmo en base tres de $2n$.

IDEAS APLICADAS

Mark Fischetti

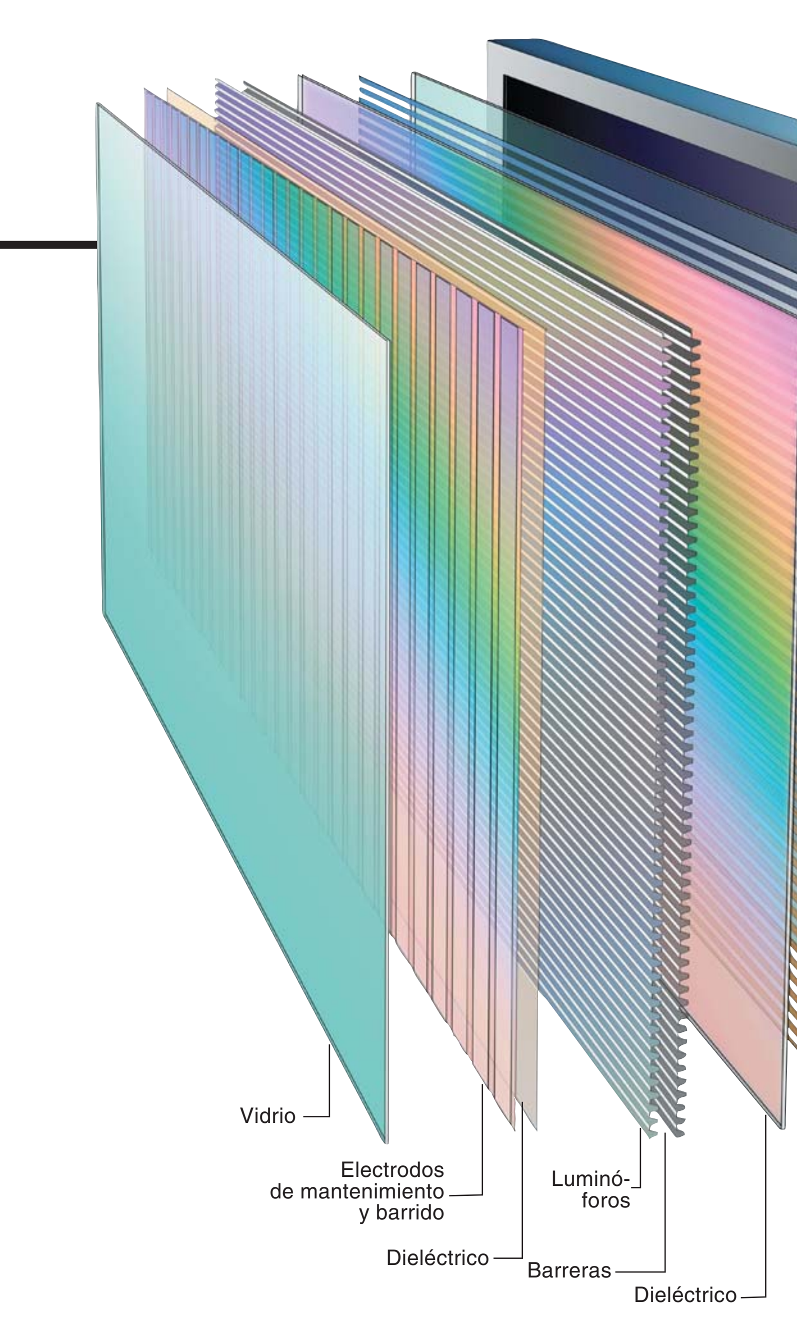
Pantallas planas

Los televisores de plasma son el nuevo símbolo de categoría social. Pese a su precio de 5000 euros, y más, se venden como rosquillas. Las pantallas, tan delgadas, planas y ligeras, pueden colgarse de la pared como un cuadro; el televisor, hasta ahora pesado y voluminoso, se convierte en un fino objeto de diseño.

Las pantallas de plasma, las reinas del mercado, miden 45, 50 y 60 pulgadas en diagonal (114, 127 y 152 cm), pero tienen un grosor de sólo 75 a 125 milímetros. Su resolución y luminosidad rivalizan con las de los mejores tubos de rayos catódicos. Aunque el inconveniente obvio sea el precio, hay un defecto del que se habla menos: como para excitar el gas emparedado entre dos placas de vidrio hace falta una gran tensión eléctrica, de 160 a 200 volts, estos aparatos consumen mucha potencia y desprenden calor en abundancia. Además, se les pueden quedar grabadas falsas imágenes en los píxeles al cabo de unos diez años, según Peter H. Putman, experto en pantallas y presidente de Roam Consulting, firma de Doylstown (Pennsylvania), si se reproducen persistentemente imágenes estáticas con contraste fuerte.

Los televisores de plasma han causado sensación, pero también tienen rival: las pantallas de cristal líquido. Son delgadas y ligeras, no se calientan tanto y cuestan algo menos. Pero la imagen se descompone si el espectador mira desde ángulos extremos; los problemas de fabricación en los tamaños mayores quizá les impondrán como límite las 36 pulgadas (91 cm), afirma Richard M. Lewis, vicepresidente de Zenith. Eso significa que las pantallas de plasma podrían acaparar el mercado de las pantallas grandes, pues los aparatos de rayos catódicos quizá no puedan superar las 40 pulgadas (101 cm); como señala Lewis, resultan demasiado profundos y difíciles de fabricar conforme aumenta el tamaño, al tener que colocarse cada vez más atrás el cañón de electrones que barre el vidrio de un lado a otro.

Pero el futuro podría estar en los diodos emisores de luz orgánicos, finas películas de polímero que se encienden para crear imágenes. Afirma Putman que fabricantes como DuPont y Samsung han construido pantallas de este tipo que miden poco más de tres milímetros de grueso; algunas pueden doblarse como una hoja de plástico. Las pantallas no miden por ahora más de unos centímetros, pero ya las llevan teléfonos celulares y videojuegos de mano. “Es muy pronto para decir qué técnica prevalecerá,” según Putman, “pero puede que el tubo de rayos catódicos tenga sus días contados.”



DANIELS & DANIELS

1. EN LAS PANTALLAS DE PLASMA se aplica tensión eléctrica a unos electrodos transparentes. Estos generan una descarga en el seno de un gas noble, neón o xenón. Se crea así un plasma. Conduce brevemente la electricidad y emite un brote de rayos ultravioleta, que estimulan a los luminóforos para que desprendan luz roja, verde o azul desde el panel frontal hacia el espectador. La polaridad se invierte para despejar las cargas eléctricas y preparar el ciclo siguiente. Cada conjunto de tres cámaras contiguas, rojo, verde y azul, constituye un píxel; una pantalla puede tener hasta un millón.

¿SABIA USTED QUE...?

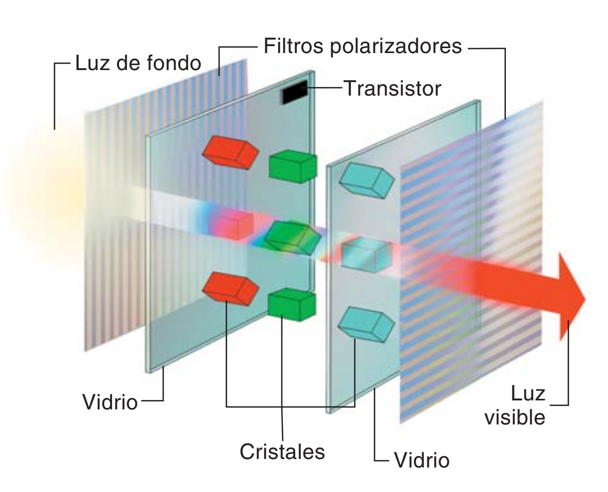
➤ **I SIN D:** Los ingenieros estadounidenses llevaron a cabo gran parte de la investigación de vanguardia que desembocó en las pantallas ultradelgadas, pero a menudo fueron empresas de otros países las que introdujeron los primeros productos. Según Peter H. Putman, la Universidad de Illinois concibió la idea de la pantalla de plasma en 1964, y Owens-Illinois, IBM y Plasmaco realizaron las investigaciones subsiguientes; fueron, en cambio, empresas asiáticas —Fujitsu, Sony, Samsung— las que las presentaron a los consumidores. RCA creó el primer prototipo de panel de diodos de cristal líquido en la década de 1960, sólo para que Sharp Electronics incluyese las primeras pantallas de ese tipo en sus calculadoras a principios del decenio siguiente.

➤ **EL TAMAÑO IMPORTA:** El televisor de plasma Zenith de 40 pulgadas en diagonal (101 cm), tiene un grosor de 3,1 pulgadas (79 mm) y pesa 33 kg, caja incluida. El televisor clásico de rayos catódicos de 36 pulgadas (91 centímetros) que ofrece la misma firma tiene un grosor de 23,9 pulgadas (607 mm) y pesa 68,5 kg; además, la imagen es un 20 por ciento menor. Diferencia de precio: unos 3000 euros.

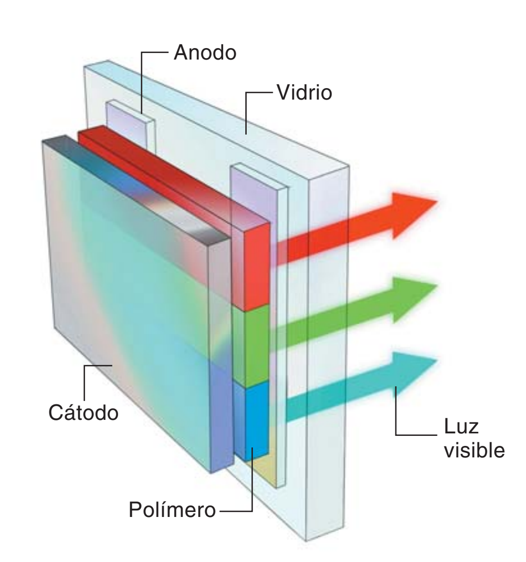
➤ **JUSTIFICACION:** Pocos consumidores podían justificar el exorbitante precio de venta al público de las primeras pantallas de plasma, pero Rick Marin, colaborador de cultura del *New York Times*, encontró el camino al ver, en marzo de 2001, que un aparato Sony de 42 pulgadas acababa de ser "rebajado" a 7999 dólares. "Mi apartamento debe de valer a razón de 5000 dólares el metro cuadrado", escribía desde su domicilio de Manhattan. "Con un televisor plano en la pared, podría deshacerme del viejo y ganar 1,6 metros cuadrados de espacio en el suelo. Eso tiene un valor inmobiliario de 8000 dólares. Todavía me ahorraría un dólar."

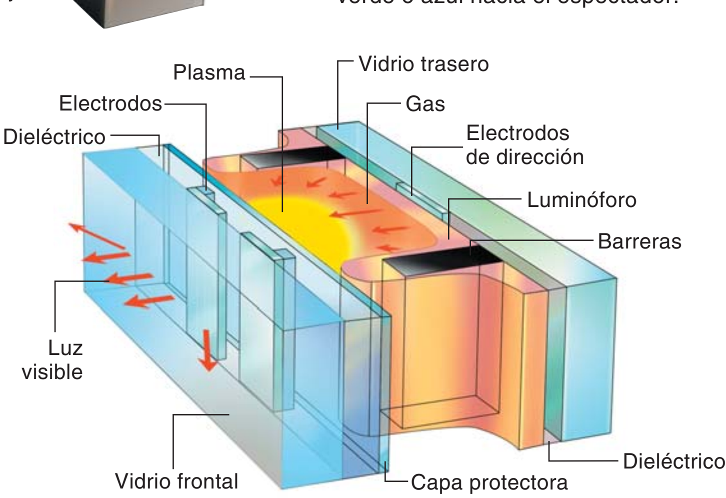


2. EN LAS PANTALLAS DE CRISTAL LIQUIDO, una luz de fondo atraviesa una matriz de píxeles minúsculos, llenos de cristales líquidos. Un transistor de película delgada aplica tensión eléctrica a cada pixel; los cristales se orientan según ángulos diversos para permitir el paso de diferentes cantidades de luz roja, verde o azul a través del vidrio frontal hacia el espectador.



3. LOS DIODOS EMISORES DE LUZ ORGANICOS son películas delgadas. Sobre un sustrato de vidrio flexible se depositan un ánodo metálico, un polímero orgánico y un cátodo también metálico para formar un pixel. Entre el ánodo y el cátodo se establece una corriente que envía electrones y huecos al polímero, donde chocan y hacen que el polímero emita en rojo, verde o azul hacia el espectador.





LIBROS

Ciencia medieval

La importancia de la traducción

THE REVIVAL OF PLANETARY ASTRONOMY IN CAROLINGIAN AND POST-CAROLINGIAN EUROPE, por Bruce S. Eastwood. Ashgate; Aldershot, 2002.

POWER IN THE PORTRAYAL: REPRESENTATIONS OF JEWS AND MUSLIMS IN ELEVENTH AND TWELFTH-CENTURY ISLAMIC SPAIN, por Eoss Brann. Princeton University Press; Princeton, 2002.

STUDIEN ZUR VERBREITUNG VON ÜBERSETZUNGEN ARABISCHER PHILOSOPHISCHER WERKE IN WESTEUROPA 1150-1400, por Harald Kischlat. Beiträge zur Geschichte der Philosophie und Theologie des Mittelalters. Band 54. Aschendorff Verlag; Münster, 2000.

THE TROTULA. Introducción y versión inglesa de Monica H. Green. University of Pennsylvania Press; Philadelphia, 2001.

DIE ENZYKLOPÄDIE IM WANDEL VOM HOCHMITTELALTER BIS ZUR FRÜHEN NEUZEIT. Dirigido por Christel Meier. Akten des Kolloquiums des Projekts D im Sonderforschungsbereich (19.11.-1.12. 1996). Wilhelm Fink Verlag. Munich, 2002. **SANTO TOMÁS DE AQUINO. OPÚSCULOS Y CUESTIONES SELECTAS. I. FILOSOFÍA.** Antonio Osuna (coord.). Biblioteca de Autores Cristianos; Madrid, 2001. **STUDI DI LESSICOGRAFIA FILOSOFICA MEDIEVALE,** por Marie-Dominique Chenu. Edición preparada por Giacinta Spinosa. Leo S. Olschki editore; Florencia, 2001.

En la alta Edad Media el cómputo precedió a la astronomía. No es que los Padres de la Iglesia hubieran abandonado el estudio del cosmos. A su estructura se había referido en numerosas ocasiones san Agustín y nuestro Isidoro le dedicó el libro tercero de las *Etimologías*. Pero el occidente europeo de los siglos séptimo y octavo puso todo su empeño en el calendario, que le permitía predecir la fecha de la Pascua, es decir, la luna llena que ocurría tras el equinoccio de primavera.

Aunque no se abandonó, por supuesto, el cómputo con la dinastía iniciada por Carlomagno, hubo otros factores que impulsaron el espectacular desarrollo de la astronomía antes de que llegaran, vertidas, las fuentes griegas y árabes (*The Revival of Planetary Astronomy in Carolingian and Post-Carolingian Europe*). En ese apogeo, definido por la creación de una teoría planetaria en el siglo nono, intervinieron, por igual, el uso o invención de instrumentos, las observaciones y una reinterpretación reflexiva de textos latinos clásicos y tardíos. Si el cómputo animó una mejor cartografía de los movimientos del Sol y de la Luna, y si, en el siglo XI, los astrolabios aportaron nuevos métodos y mayor exactitud a las mediciones luni-solares, fue un conjunto de textos latinos lo que avivó el interés por el movimiento de los otros cinco planetas y aportó las bases para su estudio.

Cuatro puntos —posiciones, intervalos ordenados, ápsides y latitudes— contribuyeron a centrar la astronomía en los planetas. Cuatro escritos clásicos son los destacados por Eastwood: la *Historia Natural* de Plinio, la traducción por Calcidio del *Timeo* de Platón con un extenso comentario, la glosa de Macrobio al ciceroniano *Sueño de Escipión* y la alegoría de Marciano Capella *Sobre el matrimonio entre Filología y Mercurio*. Esa reinterpretación, un ejemplo de construcción de modelos, se plasmó a través de diagramas agregados al margen. Las imágenes del movimiento de los planetas constituyeron la principal herramienta prescriptiva. De ellas se servían los maestros carolingios para la explicación de los pasajes obscuros, deshacer ambigüedades o cohonestar posiciones aparentemente contradictorias.

Para Capella, las órbitas del Sol, Mercurio y Venus se hallaban interconectadas de una manera muy peculiar. La Tierra no ocupaba el centro de las órbitas planetarias, aunque sí el del círculo lunar; tampoco se hallaba en el interior de la trayectoria de Mercurio o Venus. Estos dos planetas describían círculos en torno al Sol. El manuscrito Voss. lat. F.48, de la Biblioteca de la Universidad de Leiden, escrito en el valle del Loira antes de mediados del siglo nono, contiene el texto de Capella. Los diagramas astronómicos que acompañan a las glosas constituyen la fuente de un conjunto de diagramas, virtualmente idénticos, que aparecen en tres manuscritos más tardíos de esa misma centuria. Si estas representaciones promovieron el debate astronómico, no le anduvieron en zaga las que acompañaban a la obra de Calcidio, en particular su comentario al *Timeo*. Los carolingios prestaron ya especial atención a la explicación del movimiento planetario epicíclico y excéntrico.

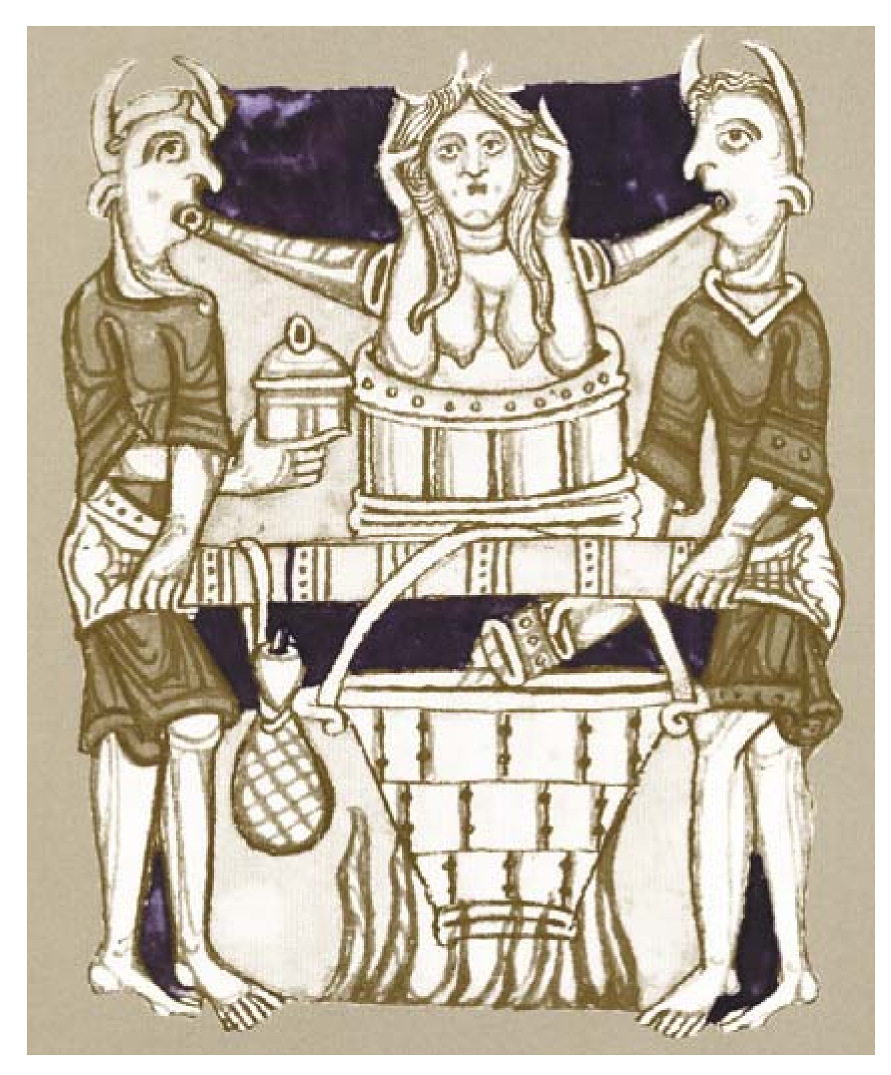
En la historia de la ciencia medieval, Salerno constituye un punto de inflexión. Pero si hubo un desarrollo astronómico anterior, también existió una medicina presalernitana digna de tal nombre. Los textos de origen romano, traducciones tardoantiguas del griego e incluso algunas composiciones latinas procedentes del período carolingio se seguían transmitiendo dentro y fuera de la corte y los monasterios. Reconocido eso, en Salerno empieza, en el siglo XII, el renacimiento medieval, indisoluble de las traducciones del árabe al latín realizadas, durante el último tercio del siglo XI, en el monasterio cercano de Montecasino. Los tratados salernitanos sobre la dieta, orina, fiebres, farmacología o medicina general guiarían la enseñanza y la praxis en adelante.

Entre los primeros escritos ginecológicos figura la *Trotula*, un con-

junto integrado por tres tratados: *Libro sobre las condiciones de las mujeres*, *Tratamientos de mujeres* y *Cosmética de mujeres* (*The Trotula*). Hablamos del compendio más influyente de esa vertiente de la medicina en la Europa medieval. Se supone, sin mayor fundamento, que Trota vivió a caballo de los siglos XI y XII y que fue la primera mujer que enseñó medicina en Salerno. Mayor respaldo goza la tesis de Green, para quien los tres textos se habrían originado allí en su etapa renaciente y reflejarían las ideas de al menos tres autores.

Cada texto atravesó diversos estadios de revisión y circuló independiente. Pero los tres conocieron también un segundo destino, paralelo. A finales del siglo XII, un compilador anónimo los cosió en un solo manuscrito, revisando ligeramente el texto, añadiendo nuevo material y reordenando unos cuantos capítulos. Esta agrupación se difundió con el título *Summa que dicitur Trotula*. De ésta corrieron numerosas versiones. La más estable pertenece a mediados del siglo XIII. ¿Cuál era su contenido?

Aunque la patología de la mujer medieval no difería mucho de la que aflige a la mujer contemporánea —enfermedades óseas provocadas por déficits alimentarios (falta de vitamina D, por ejemplo), infecciones (lepra, peste, etc.) o procesos degenerativos normales del cuerpo—, no debemos abordar las descripciones y remedios indicados con la óptica de la biología moderna. Los dos textos ginecológicos de la *Trotula* se insieren en un marco teórico galénico, humoral. Las *Condiciones de las mujeres* (*Trotula major*) es una composición esencialmente libresca basada en el *Viaticum*, uno de los más importantes de los textos médicos traducidos en Montecasino, al que se añadieron remedios que corrían desde tiempo atrás por Europa. El *Tratamiento de las mujeres* (*Trotula minor*) constituye, por el contrario, una amalgama de remedios empíricos con un barniz superficial de base teórica; manifiesta escasos signos de influencia directa de las nuevas traducciones de la medicina árabe. Por último, *Cosmética de las mujeres*, probablemente el primer texto medieval latino sobre el particular, refleja el lado empírico de la medicina salernitana. Describe de la cabeza a los pies cómo embellecerse la piel, el cabello, la cara, los labios, los dientes y los genitales.



Mujer tomando un baño. Procedente del Antidotarium magnum *salernitano, del siglo XII*

El contenido teórico no emanaba sólo de los tratados médicos que empezaban a traducirse, sino también de los escritos de filosofía natural recién trasladados. Por lo demás, en numerosos casos los autores eran los mismos. Se vertieran en el sur de Italia o, muy pronto, en España, ¿cuál fue su difusión? (*Studien zur Verbreitung von Übersetzungen arabischer philosophischer Werke in Westeuropa*). Para averiguarlo, Harald Kischlat ha rastreado manuscritos y catálogos de bibliotecas del continente. La difusión refleja una escalonada recepción y asimilación.

Europa entera —de Nápoles a Colonia, de París a Oxford— desarrolla una intensa actividad intelectual en el siglo XIII, con la fundación de las universidades y la organización de las disciplinas académicas. Puede permitírselo porque se trabaja con el nuevo Aristóteles, la nueva medicina, el nuevo Euclides y Ptolomeo. Si las primeras traducciones de textos filosófico-naturales proceden de mediados del siglo XII, cien años después corre ya la versión latina del grueso del saber clásico y árabe. No es infrecuente que a la traslación de un texto suceda otra casi siempre mejor. El tratado *Sobre el entendimiento* de Alkindi (m. 870), vertido primero por Dominicus Gundissalinus, pasó otra vez al latín, también en Toledo,

del puño de Gerardo de Cremona (†1187). Del propio Alkindi tradujo también Gerardo *Sobre el sueño y la visión*.

Si Gundissalinus "se especializó" en obras de epistemología (así la mencionada y *Sobre las ciencias*, de Alfarabi), no podemos entender el despegue de la psicología, por ejemplo, sin el libro *Sobre la diferencia entre espíritu y alma*, de Costa ben Luca (c. 820-912), traducido por Iohannes Hispaliensis antes de 1143. Por esas fechas Avendauth hacía asequible el *Canon* de Avicena. Michel Scott, célebre por verter el Aristóteles naturalista, hizo posible, a principios del siglo XIII, la extraordinaria influencia del pensamiento científico y filosófico de Averroes.

Lo árabe carece, en la ciencia medieval, de connotaciones étnicas. Se refiere a la lengua en que se expresa una doctrina, sea de un persa (Avicena), de un cristiano (Costa ben Luca) o de un judío. En España, la coexistencia de musulmanes, judíos y cristianos en un mismo territorio facilitó el proceso traductor. Una coexistencia difícil (*Power in the Portrayal*). Ross Brann revela las relaciones entre musulmanes y elites judías en el al-Andalus de los siglos XI y XII, en particular, a través de las controversias que rodearon la figura de Samuel haNagid, oficial todopoderoso de la administración Zirid. Se trata de un largo período en el que los judíos alcanzaron la mayor prosperidad material e influencia en la sociedad musulmana andalusí, intervalo temporal de cultivo intensivo de la ciencia y la filosofía. Pero el estado de general agitación en que se vivió durante los reinos de taifas facilitó la invasión almorávide. La anexión posterior de al-Andalus al Maghrib terminó con esa "edad de oro".

Para poner orden en la avalancha de conocimientos que aportaron las traducciones y hacerlos asequibles a una sociedad en creciente proceso de urbanización apareció un género que alcanzó notable éxito, las enciclopedias (*Die Enzyklopädie im Wandel vom Hochmittelalter bis zur frühen Neuzeit*). El término "enciclopedia" no es medieval, por supuesto, ni en el tipo de escritos con él designados están siempre de acuerdo los investigadores.

Vincent de Beauvois redactó hacia 1244 una imponente, el *Speculum maius*, dividido primero en dos partes y, muy pronto, en tres: natural ("Speculum naturale"), doctrinal ("Speculum doctrinale") e histórica ("Speculum historiale"). Conocerá hasta el siglo XVII una gran difusión por Europa entera. Esta enciclopedia expone el orden de las cosas según un plan lógico, que evita la especulación para recoger lo que se sabe y debe saberse en una facultad de artes. Merced a su carácter abierto, experimenta una constante adaptación y refundición con nuevos materiales. De los treinta y tres libros de partida se pasa pronto a la cincuentena. A propósito del agua, por ejemplo, encadena sus propiedades naturales y de los lugares donde se halla (mar, océanos, estuarios, mareas, fuentes, ríos, lagos, pozos, cisternas, piscinas y baños); indica sus cualidades organolépticas y medicinales, así como sus aplicaciones químicas. Puesto que Vincent es un compilador, extracta de sus contemporáneos Alejandro de Halès, maestro de la Universidad de París, Alberto Magno, que ha enseñado también en París, y Thomas de Cantimpré, autor éste de una pequeña enciclopedia natural (*De natura rerum*). Busca apoyo en naturalistas del siglo XII, en particular los de la célebre escuela de Chartres (Guillaume de Conches), Adelardo de Bath y traducciones de Avicena o Hali Abbas. Para los asuntos de hidráulica, se fía de Vitrubio.

Enciclopedistas influyentes fueron también Bartolomeo Anglico, Thomas de Cantimpré y el ahora reivindicado Arnoldus Saxo con su *De floribus rerum naturalium*. De su contribución sobresale el lapidario, o exposición de los minerales. Arnoldus trabajó en torno a 1270. Escribió un tratado de medicina, *De causis morborum et figuris simplicibus quoque compositis medicinis*, que estructura en diez libros y donde aborda cada enfermedad de acuerdo con el sistema clásico de la cabeza a los pies, amén de conceder un lugar importante a la farmacopea y a la confección de medicamentos. Nos hallamos así ante una obra moderna, donde la biología, aristotélica evidentemente, constituye el armazón teórico subyacente.

En la introducción de Aristóteles en el pensamiento latino nadie hizo tanto como Alberto y su discípulo más famoso (*Santo Tomás de Aquino. Opúsculos y Cuestiones Selectas. I. Filosofía*). Y pocos han profundizado tanto en la ubicación histórica de éste como Marie-Dominique Chenu (*Studi di Lessicografia Filosofica Medievale*). Santo Tomás, desde sus primeros escritos —*Los principios de la naturaleza*— hasta los tratados de madurez —*Sobre la eternidad del mundo* y *Sobre la unidad del entendimiento*—, va sistematizando la nueva filosofía de la naturaleza y de la antropología. En el primero de los opúsculos citados, reelabora la filosofía natural aristotélica transmitida a través de los comentaristas árabes de los dos siglos precedentes. Sabido es que el concepto de movimiento —en sentido amplio de cambio de estado— constituía el eje de la física del estagirita. Pero la determinación de los fundamentos del cambio le lleva al dominio de las causas, campo de la metafísica.

Al editor de *Los principios de la naturaleza*, que se extiende en una exposición tradicional del hilemorfismo y de los conceptos de causa, naturaleza y privación que podemos hallar en cualquier manual escolástico, se le escapa la noción de elemento como pilar de la fisicoquímica, si vale la extrapolación, de Tomás de Aquino. Si para explicar la naturaleza, principio de movimiento, se funda en *Sobre la generación y corrupción* así como en la *Metafísica* de Aristóteles, no parece que pueda entenderse el concepto tomista de elemento sin referencia a las partes homeómeras de los textos biológicos griegos. En ese aspecto, cierto que sólo en ese aspecto, el aquinate reduce la biología a la física.

Al desentrañamiento del vocabulario filosófico medieval le dedicó Chenu decenios. No tomaba los términos como expresión hipostasiada, inalterable en el curso del tiempo, del objeto o proceso designado, sino como expresión dinámica de un conocimiento que se iba enriqueciendo con los nuevos recursos de la dialéctica o de la observación más fina.

—LUIS ALONSO

Aventuras problemáticas

Dennis E. Shasha

Primos espías

La teoría de números, tenida en tiempos por disciplina esotérica que se ocupaba de las curiosas propiedades de los números primos, se encuentra hoy en las entrañas mismas de la criptografía moderna. El algoritmo criptográfico RSA (sigla de sus inventores, Rivest, Shamir y Adleman), utilizado en la mayoría de las transacciones de comercio electrónico, se funda en la dificultad (no demostrada matemática, pero sí empíricamente) de descomponer en factores un número compuesto por el producto de dos números primos.

La multiplicación de dos números primos grandes constituye un ejemplo de las llamadas "funciones de una sola dirección": la multiplicación requiere escasos microsegundos, siendo tal tiempo proporcional a la longitud de las representaciones binarias de los números; por el contrario, el descubrimiento de los factores dado solamente el producto es un proceso lento, que exige varias horas para un producto de 512 bits, y que a partir de ahí continúa con un crecimiento exponencial lento en función de la longitud binaria del producto. Para números de 2048 bits la descomposición factorial se considera prácticamente inviable, al menos que se sepa. Los algoritmos de factorización rápida, de existir, tendrían un sinfín de aplicaciones en el espionaje industrial e incluso en el militar.

Lo cual nos lleva a un problema propuesto por John McCarthy (inventor del lenguaje Lisp y teórico de la inteligencia artificial) y que resolvió Michael Rabin (inventor de tantos e importantes algoritmos informáticos) allá por los años cincuenta. El problema reza como sigue: Disponemos de un puñado de espías dispuestos para entrar en territorio enemigo. Deseamos evitar que sean atacados cuando traten de regresar a territorio propio, y también, lógicamente, la infiltración de espías enemigos. Así pues, cada espía ha de presentar una contraseña a los guardias fronterizos, que éstos comprobarán. Aunque tenemos confianza en nuestros espías y en la lealtad de los guardias, existe el temor de que éstos se vayan de la lengua por las noches en algún bar. ¿Qué información habrían de recibir los guardias, y de qué modo han de presentar los espías sus contraseñas, de manera que sólo los agentes propios puedan pasar, y nadie más? Puede dar por supuesto que lo dicho sobre números primos es una pista.

Solución del problema del mes pasado:

Si repartimos nuestra inversión entre 10 compañías, dedicando a cada una 1,43 millones, la probabilidad de que al menos 7 produzcan rendimientos decuplicados es de más del 95 por ciento. Si así ocurre, el retorno de inversión total sería de 100,1 millones. Esta estrategia deja 2,7 millones en reserva para futuras inversiones. Puede verse una explicación completa en www.investigacionyciencia.es.

Solución en la Red

Se hallará la solución del problema de este mes visitando www.investigacionyciencia.es.



SARA CHEN

INDICE ANUAL

Este índice contiene los títulos de los artículos y los nombres de los autores aparecidos en Investigación y Ciencia *a partir de enero de 2002.*

MATERIAS

AUTORES

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



COLISION ESTELAR, por Michael Shara

En astronomía se creía que la colisión estelar constituía un fenómeno imposible. La verdad parece otra. Podría ser un episodio frecuente en los arrabales de las galaxias.

CELULAS DENDRITICAS, por Jacques Banchereau

Las células dendríticas atrapan a los invasores y comunican al sistema inmunitario cuándo y cómo responder. Las vacunas dependen de ellas. Revisten particular interés para potenciar la inmunidad contra el cáncer.

GLADIADORES: UN NUEVO ORDEN DE INSECTOS, por Joachim Adis, Oliver Zompro, Esther Moombolah-Goagoses y Eugène Marais

Un misterio del ámbar se resuelve en una montaña del desierto con un descubrimiento que ha dejado atónitos a los entomólogos.

PROCESOS ELECTRONICO-VIBRACIONALES, por Roberto Acevedo

La naturaleza e implicaciones del acoplamiento electrónico-vibracional, o vibrónico, hallan su explicación en el acoplamiento entre iones nucleares y electrones.

TERRORISMO RADIACTIVO, por Michael A. Levi y Henry C. Kelly

Las armas radiactivas, en manos de los terroristas, podrían difundir polvo radiactivo en las ciudades, provocando el pánico, elevando los casos de cáncer y obligando a costosas descontaminaciones.

REGLAS DEL MUNDO CUANTICO, por Michael A. Nielsen

Una nueva y excitante disciplina de investigación fundamental combina la ciencia de la información y la mecánica cuántica.

LA LENGUA ORIGINARIA DE LOS EUROPEOS PREHISTORICOS, por Elisabeth Hamel, Theo Vannemann y Peter Forster

En muchos topónimos y nombres de ríos europeos se agazapan palabras emparentadas con el vasco. Estos nombres se pusieron poco después de la última glaciación. Aun hoy todos los europeos están estrechamente emparentados con los vascos, pueblo preindoeuropeo. Lingüistas y genéticos dan cuenta en estos trabajos del estado actual de esta teoría.

DE LAS PROFUNDIDADES DE LA TIERRA A LAS PROFUNDIDADES DEL SISTEMA SOLAR, por Mario Trieloff y Tilmann Althaus

La investigación de los gases nobles en rocas del interior de la Tierra no sólo permite predicciones sobre la evolución de la estructura de la Tierra, sino que además nos informa acerca de la historia temprana de la formación de todos los planetas terrestres. Esta "astronomía de laboratorio" geocientífica abre perspectivas insospechadas de los primeros tiempos del sistema solar.

